

Pasantía de Investigación en Apoyo Para La Definición de Zonas Húmedas y Mapa de
Suelos en el Sector de La Mesa de Los Santos, Santander.

Autor

Juan Sebastián Góngora Orozco

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo.

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Codirectora

María Alejandra Cetina Tarazona

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi abuelo y a mi madre.

Un paso de diez mil.

“Los extremos nos alejan de la virtud”

-Aristóteles

Agradecimientos

A todo aquel que la vida decidió unirme en sangre o en camino y hoy llamo familia, por su apoyo infinito e incondicional.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS) por su imparable tarea de formar a las nuevas juventudes críticas, rebeldes e insumisas de esta interminable tierra.

A mi director de proyecto Geólogo Juan Diego Colegial por su guía y forma de transmitir conocimiento; por medio de ejemplos, discursos y críticas.

Agradezco de manera especial a mi codirectora Geóloga María Alejandra Cetina por su incesable atención, ayuda, aportes y guías para el desarrollo y conclusión de este trabajo; por su mirada atenta y dedicación con cada detalle del texto.

A la escuela de Geología.

Al proyecto “Estudio integral del agua en La Mesa de Los Santos” por su disposición en recursos para el desarrollo de las salidas de campo.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	13
1. Generalidades del área de estudio	14
2. Planteamiento del problema y Justificación	16
3. Objetivos.....	18
3.1. Objetivo General.....	18
3.2. Objetivos Específicos	18
4. Marco teórico.....	19
5. Antecedentes.....	22
6. Métodos y procedimientos	24
6.1. Adquisición de datos:	25
6.2. Elaboración mapa de definición de zonas húmedas	25
6.3. Elaboración mapa multitemporal	32
6.4. Validación en campo	34
6.5. Elaboración mapa de suelos	35
7. Resultados.....	41
7.1. Mapa de zonas húmedas	41
7.2. Mapa multitemporal	49
7.3. Validación en campo	54

DEFINICIÓN DE ZONAS HÚMEDAS Y MAPA DE SUELOS	5
7.4. Mapa de suelos	55
8. Discusión	73
9. Conclusiones.....	74
9.1. Mapa de zonas húmedas	74
9.2. Mapa multitemporal	75
9.3. Mapa de suelos	75
Referencias y Bibliografía	77
Apéndices	81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.....	15
Figura 2. Esquema metodológico para el mapa de zona húmedas.	27
Figura 3. Esquema metodológico planteado para la elaboración del mapa de suelos.....	36
Figura 4. Organización y nomenclatura de las unidades cartográficas de los suelos. Modificado de (IGAC I. , 1998).....	39
Figura 5. Esquema de organización de capas en el SIG.	40
Figura 6. Mapa de distribución de humedades superficiales para el mes de febrero 2019.	43
Figura 7. Mapa de distribución humedades superficiales para el mes de agosto 2019.	44
Figura 8. Datos cruzados de la información obtenida de humedades entre febrero y agosto de 2019.	45
Figura 9. Mapa de zonas de cambio de las humedades entre febrero y agosto del año 2019.	46
Figura 10. Precipitaciones del año 2019 en la estación La Mesa.	47
Figura 11. Mapa de definición de zonas húmedas de la zona de estudio.	49
Figura 12. Mapa de distribución de humedades para los años 2014, 2016, 2017, 2019, 2020 y 2023.	50
Figura 13. Relación precipitación para cada año con la cantidad porcentual de zonas vigorosas de vegetación y humedad del suelo.....	52
Figura 14. Mapa generalizado de unidades cartográficas de suelos.....	56
Figura 15. Leyenda del Mapa de unidades cartográficas de los suelos.....	57
Figura 16. Unidades de Altiplanicie.	58

DEFINICIÓN DE ZONAS HÚMEDAS Y MAPA DE SUELOS

7

Figura 17. Unidades de Lomerío..... 60

Figura 18. Unidades de Montaña..... 65

Figura 19. Unidad de Piedemonte..... 70

Figura 20. Unidades de Planicie..... 71

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Datos de adquisición de información satelital Landsat 8 para el año 2019.....	26
Tabla 2. Fechas de adquisición de las imágenes Landsat 8 del mapa multitemporal.....	33
Tabla 3. Metodología planteada para adquisición de datos en campo.	34
Tabla 4. Insumos generales y sus clasificaciones para la generación del mapa de suelos. ..	39
Tabla 5. Valores NDVI obtenidos para el año 2019, mes de febrero.....	41
Tabla 6. Valores NDVI obtenidos para el año 2019, mes de agosto.....	41
Tabla 7. Distribución en área y porcentaje de cada clasificación para cada año en época poco lluviosa.	51
Tabla 8. Suma de porcentajes de valores de humedad altos y bajos de humedad del suelo para cada uno de los años adquiridos, junto a la precipitación del mes de la toma.	53

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Cálculo para encontrar el (TOA).	28
Ecuación 2. Cálculo del (TOA) Reflectancia atmosfera superior.	28
Ecuación 3. Cálculo para encontrar la temperatura de brillo (Bt).	29
Ecuación 4. Cálculo de la temperatura de brillo (Bt).	29
Ecuación 5. Ecuación de cálculo para el valor NDVI.	29
Ecuación 6. Ecuación para el cálculo de la proporción de vegetación (Pv).	30
Ecuación 7. Cálculo de la Emisividad (e).	30
Ecuación 8. Cálculo de la temperatura superficial del suelo (LST).	31
Ecuación 9. Cálculo del índice de la humedad superficial del suelo (SMI).	31
Ecuación 10. Cálculo del área abarcada por cada clasificación según el número de píxeles.	34
Ecuación 11. Cálculo de la porción de vegetación para el mes de febrero 2019.	42
Ecuación 12. Cálculo de la porción de vegetación para el mes de agosto 2019.	42

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Mapa de climas.....	81
Apéndice B. Mapa de paisaje.	82
Apéndice C. Mapa de litologías.	83
Apéndice D. Mapa de pendientes	84
Apéndice E. Mapa de erosión superficial del suelo.....	84
Apéndice F. Mapa de roca superficial.	85
Apéndice G. Mapa de Isoyetas.....	86
Apéndice H. Leyenda mapa multitemporal.....	87

Resumen

Título: Pasantía de Investigación en Apoyo Para la Definición de Zonas Húmedas y Mapa de Suelos en el Sector de La Mesa de Los Santos, Santander. *

Autor: Juan Sebastian Góngora Orozco **

Palabras clave: Humedad superficial del suelo, teledetección, unidades cartográficas de los suelos, emisividad, radiancia, sistema de información geográfico.

Descripción:

Este informe de pasantía de investigación se presenta como aporte al conocimiento y entendimiento de la distribución de la humedad a partir de imágenes de satélite en diferentes tiempos y el estudio de suelos en el marco general del proyecto de investigación N°2534: “Estudio Integral del Agua en La Mesa de Los Santos” del grupo GIGBA. La problemática aún hoy latente del desabastecimiento del agua en este sector es una realidad, por lo que profundizar el conocimiento del ciclo hidrológico y su funcionamiento, ayudarían en el largo plazo a darle un mejor manejo a este preciado recurso. En este informe se presenta la estimación cualitativa de la humedad superficial del suelo por medio del método (SMI) utilizando imágenes satelitales Landsat 8, para la delimitación de zonas húmedas en diferentes meses y diferentes años y variaciones temporales frente al comportamiento hidrológico del área de estudio. De otra parte, se efectuó la cartografía de los suelos en escala 1: 25.000 con base en los factores de paisaje, clima, litología, erosión, roca superficial y pendientes.

Con los resultados se presenta la delimitación de las zonas húmedas y la distribución cualitativa de las humedades para los años 2014, 2016, 2017, 2019, 2020 y 2023, sumado a la cartografía de los suelos del área de estudio.

Los análisis arrojan la persistencia de una mayor humedad relativa hacia la zona noreste del área de estudio, que se acompaña con el comportamiento hidrológico registrado en la estación de Los Santos y las precipitaciones anuales históricas.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Directo Juan Diego Colegial Gutiérrez.

Abstract

Title: Internship research program aimed at supporting the definition of wetland areas and creating a soil map in the sector of La Mesa de Los Santos, located in the Santander department.

Author: Juan Sebastian Góngora Orozco

Key words: Surface soil moisture, remote sensing, soil cartographic units, emissivity, radiance geographic information system.

Description:

This internship research report is presented as contributions to the knowledge and understanding of the moisture distribution from satellite images at different times and the study of soils within the general framework of research project No. 2534: "Comprehensive Study of Water in La Mesa de Los Santos" of GIGBA group. The still present problem of water shortage in this sector is a reality, so deepening the knowledge of the hydrological cycle and its functioning would help in the long term to better manage this precious resource. This report presents the qualitative estimation of soil surface moisture using the (SMI) method, using Landsat 8 satellite images, for the delineation of wet areas in different months and different years, and temporal variations in relation to the hydrological behavior of the study area. On the other hand, soil mapping was carried out on a 1:25,000 scale based on landscape, climate, lithology, erosion, surface rock, and slopes.

The results present the delineation of wet areas and the qualitative distribution of moisture for the years 2014, 2016, 2017, 2019, 2020, and 2023, in addition to soil mapping of the study area. The analysis shows the persistence of higher relative humidity towards the northeast of the study area, which matches the hydrological behavior recorded at the Los Santos station and historical annual rainfall.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Directo Juan Diego Colegial Gutiérrez.

Introducción

De acuerdo con (Flórez Duarte, 2019) la problemática del desabastecimiento del agua potable en el sector de La Mesa de los Santos y cómo sobrellevar esta situación es aún hoy latente, tanto que no se ha podido hallar una solución completa a corto ni mediano plazo. La falta de conexión e infraestructura en las zonas rurales como limitantes que plantea la geografía de la zona, la climatología y las precipitaciones, sumado a una profunda ineficiencia de las autoridades locales como nacionales, no ha permitido que esta amplia zona del departamento de Santander haya podido tener un flujo constante de agua aprovechable para consumo humano y otras actividades.

Tanto los suelos como la humedad de estos son factores clave que influyen de manera directa o indirecta en el ciclo del agua (Saha, 2018). De estos factores dependen la productividad agrícola de alimentos, la vigorosidad de la vegetación o el suministro del agua. Debido a lo anterior, en el marco del “Estudio Integral del Agua de La Mesa de Los Santos” se plantea proponer un modelo conceptual del funcionamiento del sistema hidrogeológico, evaluando la vulnerabilidad intrínseca y el uso histórico del agua como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico. Siguiendo lo dicho, la *Pasantía de investigación en apoyo al mapa de suelos y definición de zonas húmedas en el sector de La Mesa de Los Santos, Santander* busca, en sus resultados, aportar al conocimiento del proyecto elaborando un mapa de definición de zonas húmedas y un mapa de suelos, además de desarrollar un análisis multitemporal de la estimación cualitativa de la humedad y estudiar la relación con las precipitaciones que han ocurrido en las humedades superficiales de esta zona en el periodo determinado 2014 - 2023.

1. Generalidades del área de estudio

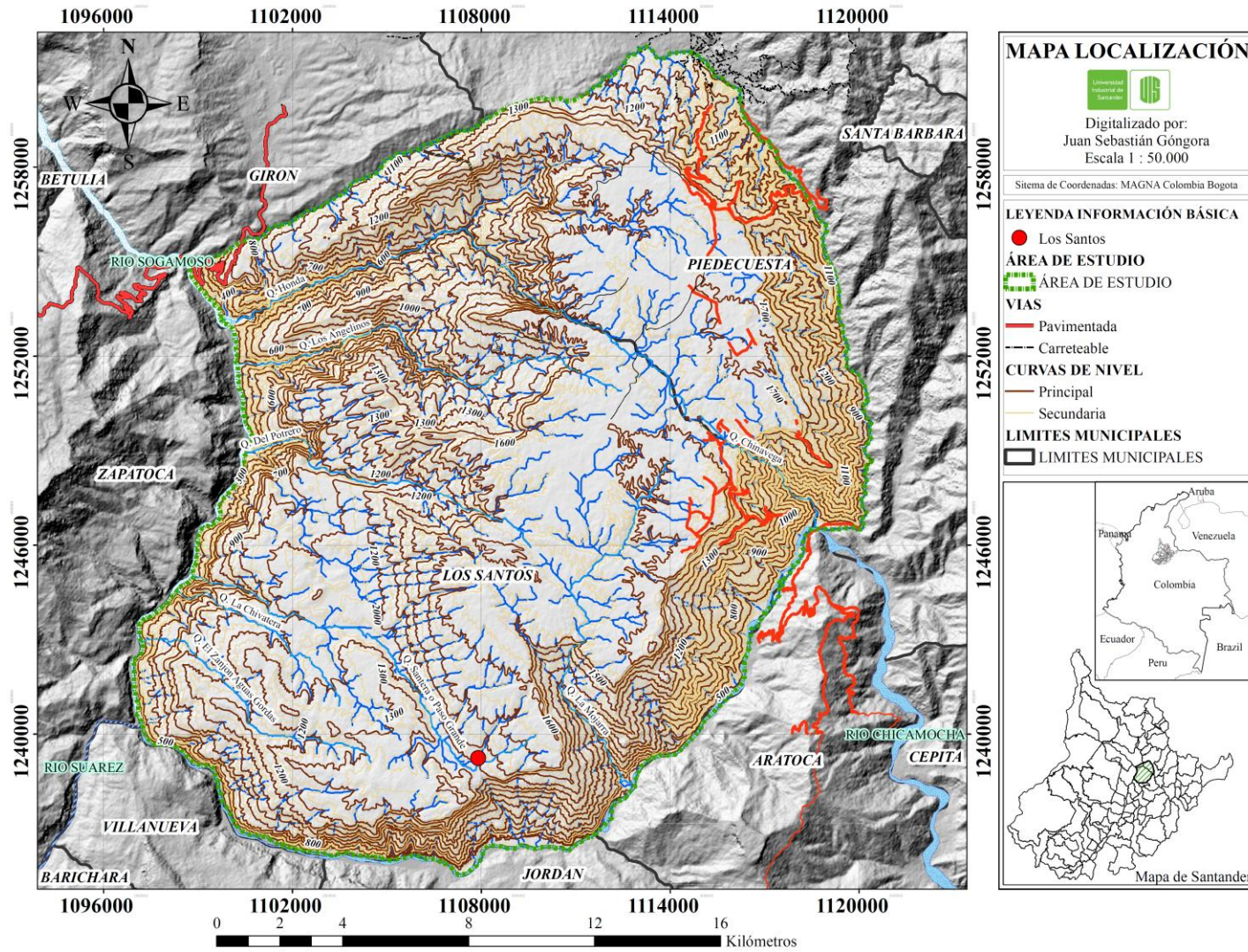
El área de estudio se encuentra conformada por el municipio de los Santos y parte de los municipios de Piedecuesta y Girón, en el departamento de Santander, con una superficie aproximada 417 km² (*Figura 1*). El casco urbano de Los Santos se encuentra a 60 km de Bucaramanga, ciudad capital del departamento.

Dentro de los ambientes geomorfológicos se encuentran ambientes denudacionales, ubicados sobre todo hacía los límites noroeste de la zona de estudio; fluviales influenciados por los drenajes que bordean el municipio como lo son el río Sogamoso y el Chicamocha y los cauces que conforman las microcuencas; y ambientes estructurales, que se definen por las diversas litologías que afloran en la zona junto con sus estructuras y buzamientos, especialmente en la zona central y la meseta estructural de Los Santos (Moreno & Silva, 2021).

La geología de la zona está compuesta por rocas de distintas edades geológicas. Dentro de estas se encuentran los esquistos de la Formación Silgará de edad paleozoica. Rocas ígneas del Granito de Pescadero. Rocas sedimentarias de la Formación Jordán (cuarzoarenitas, limolitas, areniscas y tobas de flujo con sus capas violáceas) (Suárez & Diaz, 2016) y de la Formación Girón (areniscas conglomeráticas) de edad jurásica. Rocas sedimentarias del Cretácico Inferior correspondiente a las formaciones: Los Santos (cuarzoarenitas, limolitas y conglomerados), Rosa Blanca (calizas), Paja (lutitas) y Tablazo (Calizas arenosas) (INGEOMINAS, 2010).

Figura 1.

Mapa de localización del área de estudio.



Las rocas sedimentarias de edad Jurásica y las rocas metamórficas e ígneas afloran en las laderas y escarpes, presentando pendientes moderadas a pronunciadas alrededor de los límites de la meseta estructural conformada mayoritariamente por rocas del cretácico inferior. La secuencia sedimentaria del Cretácico Inferior se expone en la meseta estructural donde afloran las formaciones Los Santos, Rosa Blanca, Paja y Tablazo. La Formación Los Santos es la unidad geológica con mayor área expuesta en la parte superior de la Meseta y se divide en tres miembros; Miembro Inferior (conglomerados y areniscas cuarzosas), Miembro Medio (limolitas, arcilitas y areniscas), y Miembro Superior (cuarzoarenitas bien cementadas) (INGEOMINAS, 2010).

2. Planteamiento del problema y Justificación

Durante las últimas décadas, la Mesa de Los Santos ha experimentado deficiencias en el suministro de agua potable debido a su uso agrícola y ganadero (Flórez Duarte, 2019). A lo largo del tiempo se han propuesto soluciones parciales para abordar esta problemática, sin embargo, no se ha encontrado una solución integral y efectiva para garantizar el suministro adecuado de este valioso recurso en esta zona del departamento.

Debido a esto surge la necesidad de profundizar el conocimiento para mejorar la gestión integral del recurso hídrico. La importancia de la variación en los componentes físicos del suelo radica en que, dependiendo de estos, la velocidad de infiltración del agua puede variar según sean las condiciones que estos presenten. Las precipitaciones de la zona también son un factor fundamental; es por esto que, dependiendo de la época del año y la cantidad de lluvias, se puede ver afectada la velocidad de infiltración del agua en el subsuelo según plantea (Ávila Dávila, 2019). Afectándose así de manera directa la recarga potencial

de acuíferos. En este punto radica la necesidad de obtener un mapa de suelos y de humedades, ya que ambos permitirían evaluar en una investigación posterior los procesos de infiltración que se dan en la zona.

Para esto se planteó generar un modelo espacial de distribución de suelos en función de sus factores de formación mediante un Sistemas de Información Geográfica y la revisión y comprobación de estos en campo. Generar un mapa de suelos de la zona permitiría delimitar; en conjunción con otras características y estudios, patrones de infiltración de tal manera que se puedan definir cuáles son las áreas de recarga de los acuíferos y así plantear mejores sistemas de cuidado para el recurso hídrico.

La definición de zonas húmedas mediante un mapa de humedades superficiales también apoyaría el conocimiento de las áreas de recarga que posibilitaría entender cómo estas zonas se han comportado en el intervalo de tiempo estudiado y se podrían plantear modelos de protección para áreas clave ante contaminación.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Elaborar la cartografía de zonas húmedas y suelos del área de estudio mediante del tratamiento de imágenes de satélite e información secundaria.

3.2. Objetivos Específicos

- Clasificar las zonas con ganancia de humedad en el área de estudio por medio del cambio observado entre una época de poca lluvia y una época lluviosa de un mismo año hidrológico mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 8.
- Evaluar los cambios de humedad de la zona de estudio mediante el tratamiento de datos de reflectancia de imágenes Landsat 8 con sus bandas 4, 5 y 10 en el periodo 2014 - 2023.
- Elaborar una cartografía de suelos con base en información geomorfológica, climática y geológica entre otras.
- Validar el mapa de suelos a partir de observaciones y descripciones en campo.

4. Marco teórico

La forma de adquirir información de suelos y humedades asociadas a estos puede realizarse mediante dos métodos bien establecidos: con muestreos en campo y pruebas de infiltración, o con métodos de detección remota (teledetección), mediante el uso de satélites y sus sensores integrados (Chuvieco Salinero, 2008). Estos métodos generalmente se complementan dado que uno puede permitir la validación del terreno mediante la toma de muestras de comprobación mientras el otro genera la información por medio de un software especializado como se muestra en (Tajudin, 2020). Los sensores remotos integrados a los *satélites* y el uso de los SIG (*sistemas de información geográficos*), permiten analizar e interpretar características de las zonas de interés antes del trabajo de campo; por su facilidad y practicidad fueron el medio utilizado en este estudio de humedades y suelos, debido a que posibilitan tratar de forma confiable y a un bajo costo la información necesaria para el desarrollo de este (Sobrino, 2001). Teniendo en cuenta que los métodos basados únicamente en el trabajo de campo presentan ciertas limitaciones debido a que su efectividad está determinada por el número de puntos de control disponibles en el terreno y las limitaciones logísticas, lo que suele impedir el tratamiento de grandes áreas debido al alto costo de instalación y mantenimiento de estas estaciones. (Saha, 2018)

La teledetección es la técnica de adquisición de datos que utiliza las reflectancias presentes en las imágenes captadas por los sensores integrados a los satélites, que se ubican en una órbita baja (órbitas inferiores a 2000 Km) y permiten tomar datos de la superficie terrestre (Sobrino, 2001). Dentro de los datos que se pueden adquirir están los de la reflectancia del agua, que posee un alto contraste para las bandas infrarrojas (*en torno a los 3000 nanómetros*) en donde la respuesta espectral permite hacer diferenciaciones entre esta

y otros materiales (Hernández & Montaner, 2009), esto debido a ser un material necesario para obtener información de humedades en plantas y suelos (López Montecinos, 1998). Entre estos se encuentran por ejemplo los canales espectrales de los tres colores RGB, por sus siglas en inglés Red, Green, Blue y los distintos tipos de infrarrojos. Para esto la misión Landsat 8 mediante su sensor OLI (*Operational Land Imager*), ofrece un campo espectral amplio desde los $0.433 \mu m$ hasta los $12.50 \mu m$ mediante las bandas anteriormente mencionadas y las de infrarrojo cercano (*NIR*, por sus siglas en inglés), sumadas a las bandas de los aerosoles, de infrarrojos de onda corta (*SWIR*) y pancromáticas que fueron útiles a la hora del desarrollo del proyecto. También se utilizaron los datos obtenidos por las bandas térmicas TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) que, igualmente, Landsat ofrece. El satélite Landsat 8 cuenta con una resolución por píxel de 30 metros para su sensor OLI y una banda pancromática que permite aumentar la resolución en imágenes multiespectrales llevándolas hasta los 15 metros por píxel; tiene una resolución de 100 metros para sus bandas TIRS y sumado a esto, una resolución temporal de 16 días. Según han propuesto múltiples autores como (Jensen, 2016; Campbell, 2007; Richards, 2014) con estas características de resolución de 100 metros se pueden generar mapas hasta de escala 1:50000 que dependen de la necesidad de detalle o de las características del trabajo que se esté buscando hacer. También (Tobler, 1987) aporta los lineamientos para la cartografía de mapas propuesta en las que el tamaño de píxel se debe multiplicar aproximadamente por 2000 para obtener la escala máxima del mapa que se busque generar. Sumado, estas imágenes son seleccionables y descargables de manera inmediata desde la plataforma Earth Explorer, del Servicio geológico de los Estados Unidos de manera gratuita (USGS, 2022), por lo que también se consideró la facilidad de la rápida adquisición.

Para el desarrollo del mapa temático de suelos se utilizó una variación de la metodología proporcionada por el (IGAC I. , 1998) y el (IGAC, 2014) las cuales establecen las directrices para la generación de cartografía de suelos mediante insumos de distinta índole como Litología, Clima, Paisaje entre otros. Además, se usaron metodologías adicionales a modo de guía y soporte como las propuestas por (Jaramillo D. F., 2002; USDA, 1999; Serrato, 2006), entre otras.

Para la delimitación de las zonas húmedas se buscó, mediante el método de álgebra de mapas calcular el índice SMI (*Soil Moisture Index, por sus siglas en inglés*), desarrollado por (Jackson, 1980) y utilizado en estudios recientes en (Bolun, 2016; Saha, 2018; Tajudin, 2020), calcular la humedad superficial del suelo en áreas extensas utilizando las diferencias de humedad entre un punto de máxima sequedad y un punto con humedad, índice que viene expresado con valores mínimos de 0 y valores máximos de 1.

El cálculo del índice de SMI requiere del índice de vegetación normalizado NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés*) (Tucker, 1979), el cual se obtiene mediante un proceso matemático de álgebra de mapas que utiliza las bandas 4 (roja) y 5 (*infrarroja cercana, NIR*) ofrecidas por Landsat 8. Este índice mide el verdor y la vigorosidad asociada a esta de la vegetación; que sumado a la variable de temperatura superficial por sus siglas en inglés LST (*Land Surface Temperature*) obtenida a través sus bandas térmicas, permite calcular la humedad superficial del suelo mediante los valores de radiancia de las imágenes asociándolos a una temperatura en grados Kelvin (Sánchez Ramos, 2021).

Los métodos de cálculo realizados mediante una herramienta SIG son idóneos para desarrollar mapas de humedades al mezclar tanto datos ópticos como térmicos para

identificar la cantidad de humedad del suelo basados en cambios biofísicos como el balance energético superficial y la cobertura vegetal (Engman, 1991), que se hayan podido ver afectados por la disponibilidad de agua del subsuelo (Saha, 2018).

Algunos de los resultados obtenidos en publicaciones previas son el relacionamiento entre la humedad del suelo y la predicción de los deslizamientos de tierra en (Tajudin, 2020), la evaluación entre el índice de la humedad del suelo (SMI) y la sequía agrícola en (Saha, 2018) y la relación entre inundaciones y la humedad del suelo superficial en (Bolun, 2016).

5. Antecedentes

En el marco del proyecto *Estudio Integral del Agua en el Sector de La Mesa de Los Santos* se han realizado estudios generales y de detalle que abarcan distintos aspectos del ciclo del agua para esta zona. Dentro de estos estudios se destaca la identificación de ambientes geomorfológicos y de favorabilidad de percolación del agua en (Moreno & Silva, 2021), la estimación de la recarga potencia mensual de acuíferos en (Garzón y Salcedo, 2022), la estimación de la escorrentía superficial consultada en el trabajo de grado de (Puentes, 2022) y el análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas al sur de la Mesa de Los Santos en (Tarazona-Lizcano et al, 2022).

Así mismo la zona cuenta con estudios hidrogeológicos a nivel regional realizados por el entonces Instituto Colombiano de Geología y Minería (*INGEOMINAS*) ahora Servicio geológico colombiano (*SGC*) en colaboración con la Universidad Industrial de Santander en el año 2007 y 2009, de los cuales se publicó la evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos en (Diaz, 2009). Finalmente se presentan

estudios de balance y recursos hídricos en las zonas del municipio de Los Santos como los realizados por (Becerra & Parra, 2016) y (Arguello et al, 2018).

Dejando en claro que no existen estudios publicados de mapas de humedades superficiales en los suelos y vegetaciones de la zona a excepción de algunos estudios generales a escala 1:100.000 de Santander por parte del IGAC y en el año 2003 por parte del EOT de Los Santos un mapa generalizado. Existen también registros de mapas de uso de suelos en el estudio de (Becerra & Parra, 2016) y de texturas de superficies en (Garzón & Salcedo, 2022) pero no se han presentado trabajos de caracterización de suelos como tal a escala 1:25.000.

6. Métodos y procedimientos

Para cumplir con los objetivos de definición de zonas húmedas y mapa multitemporal de la presente investigación, en primera estancia se debieron obtener imágenes satelitales que cubrieran la totalidad del área de estudio y que contasen con una calidad tal, que permitieran hacer una distinción general de los rasgos y características de la zona de estudio. Para esto se trató con imágenes de dominio público de la misión Landsat 8 que cumplió con las condiciones de resolución temporal, espacial, cobertura, disponibilidad y nubosidades mínimas que necesitó el proyecto. Además, disponían de una resolución de píxel de 15 metros para su banda pancromática, 30 metros para sus bandas RGB, NIR, SWIR 1 y SWIR 2 y 100 metros para sus bandas térmicas (USGS, 2022). Tratándose estas de unas resoluciones medias dentro de los distintos tipos de satélites existentes ofrecidos de manera gratuita. En conjunción se pudieron obtener mapas escala 1:50.000 para el caso de los mapas de humedades y multitemporales; y, dado que el tamaño del píxel es inferior al área mínima cartografiable para esta escala según (Tobler, 1987) esto se posibilita.

Se descartaron satélites como Sentinel enviados por la misión Copernicus de la ESA europea debido a que en la zona de La Mesa no ofrecían imágenes completas de la zona; recortando partes del área de estudio u ofreciendo imágenes que no cumplían con las condiciones anteriormente indicadas. Adicionalmente los repositorios Landsat, al contar con las bandas disponibles de variados espectros electromagnéticos y además contar con sensores térmicos (TIRS), posibilitaban realizar un tratamiento completo de las imágenes sin tener que recurrir a otros repositorios de información externos pudiendo desarrollar la metodología SMI propuesta.

6.1. Adquisición de datos:

Para el desarrollo del mapa de definición de zonas húmedas y multitemporal de humedades se seleccionaron las mencionadas imágenes Landsat 8 por cumplir el mínimo de parámetros establecidos por el proyecto dentro de lo que se encuentra; tener un máximo del 5% de nubosidad general en la imagen y un máximo del 1% de nubosidad en la zona de estudio. Además, ser de adquisición gratuita y pertenecer a repositorios abiertos. También ocupar la totalidad de la zona de estudio en única imagen y tener una resolución temporal entre tomas de máximo 1 mes. Es por esto por lo que pese a existir disponibles otros repositorios con imágenes en otros meses de estaciones poco lluviosas y lluviosas, no cumplían con los parámetros mínimos establecidos.

Respecto a cartografía de suelos se tomaron datos que no fueran anteriores al año 2000 y que sus insumos no tuvieran una escala superior a 1:25000. Para el caso de la litología y la geomorfología, el mapa ya se encontraba generado a escala 1:25000 por lo que no generaría inconveniencias a la hora de juntar escalas grandes y pequeñas. Respecto al mapa climático se utilizó un Modelo Digital de Elevación el cual contaba con una resolución de 30 metros y las isoyetas se generaron a partir de la distribución que contaban las estaciones pluviométricas para la toma de datos de precipitaciones.

6.2. Elaboración mapa de definición de zonas húmedas

El estudio para la definición de zonas húmedas se llevó a cabo en dos épocas de un mismo año hidrológico, para el caso de estudio se situó en febrero y agosto del 2019, meses que corresponden a un periodo de poca lluvia y un periodo lluvioso, respectivamente (*Tabla 1*). El objetivo de este punto fue hallar el índice de humedad del suelo para luego, mediante

un tratamiento realizado usando la plataforma SIG poder estimar el cambio en las humedades superficiales para el respectivo año hidrológico.

Tabla 1.

Datos de adquisición de información satelital Landsat 8 para el año 2019.

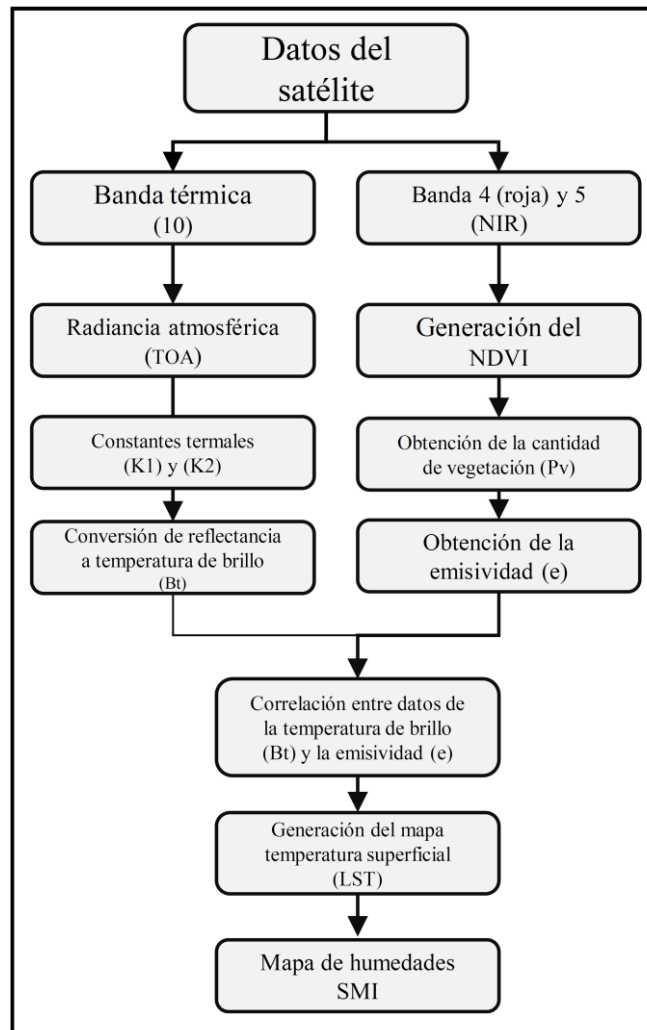
Satélite	Fecha de adquisición	Época del año	Path / Row
Landsat 8	Febrero 25 del 2019	Poca lluvia	007/055
	Agosto 20 del 2019	Lluviosa	

La metodología utilizada para el tratamiento de las imágenes satelitales fue la SMI (Jackson, 1980; D. Hunt, 2009), método que permite calcular el índice por el cual es posible estimar la humedad superficial del suelo abarcando extensas áreas de terreno utilizando únicamente la información ofrecida por los repositorios de Landsat 8. En este método también se calcula la temperatura superficial del terreno, LST y el índice normalizado de vegetación NDVI insumos fundamentales en el desarrollo metodológico (*Figura 2*).

El SMI se basa fundamentalmente en la temperatura superficial terrestre, estimada mediante el uso de la banda térmica (10) ofrecidas por Landsat y el cálculo de los índices de vegetación que expresan la cantidad de vegetación y la vigorosidad de esta.

Figura 2.

Esquema metodológico para el mapa de zona húmedas.



Como se muestra en el diagrama, el flujo de trabajo está basado en imágenes seleccionadas Landsat 8 en donde se les debe aplicar dos procesos paralelos para la obtención del SMI, primero hallar la temperatura superficial del suelo LST y el NDVI que en su conjunto proporcionan la cantidad de agua que se encuentra en superficie hasta los primeros 10 centímetros de capa (Tajudin, 2020).

Inicialmente en los métodos de cálculo para encontrar el SMI se debe calcular la *radiancia de la atmosfera superior* por sus siglas en inglés *TOA (Lλ)* dato que es fundamentalmente una calibración de la información ofrecida por Landsat y proporciona el grado de radiación electromagnética que incide sobre una superficie. Para esto se utiliza la banda térmica 10 con base en la *Ecuación 1*.

Ecuación 1. Ecuación para la radiancia atmosférica ($L\lambda$).

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + AL - O_i \quad (1)$$

En donde la radiancia de la atmosfera superior $L\lambda$ es una aproximación de la medida de la cantidad de radiación electromagnética recibida y reemitida por la superficie terrestre hacía el sensor del satélite (Hoyningen-Huene, 2003). La banda térmica base para el tratamiento se simboliza en la ecuación como ML que representa la radiancia obtenida por el sensor del satélite y Q_{cal} es un factor multiplicativo que corrige las posibles varianzas de datos para la banda 10 de Landsat. AL y O_i son factores de calibración para el tratamiento de imágenes satelitales ofrecidos igualmente por los metadatos de cada imagen de Landsat, que tienen un valor correspondiente a 0.10000 y 0.29 respectivamente; esto son valores constantes que no varían de imagen a imagen. Escrita la *Ecuación 2* en la calculadora raster del sistema de información geográfica resulta del siguiente modo.

Ecuación 2. *Cálculo de la radiancia de la atmosfera superior (Lλ).*

$$L\lambda = 0.0003342 * \text{Banda 10} + 0.10000 - 0.2900 \quad (2)$$

El proceso de obtención del SMI posterior a la calibración atmosférica requiere de la conversión de la *reflectancia atmosférica a temperatura de brillo*, Bt por sus siglas en inglés (Brightness Temperature). El Bt representa la temperatura de una superficie en función de la

cantidad de radiación que recibe y emite (Ansar, 2021). Esto se calcula utilizando la *Ecuación 3* de *temperatura de brillo* con las constantes de adquisición radiométricas de los metadatos de la banda térmica 10.

Ecuación 3. *Ecuación para encontrar la temperatura de brillo (Bt).*

$$Bt = \frac{K_2}{Ln} \left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1 \right) - 273.15 \quad (3)$$

En esta ecuación se relaciona la *reflectancia de la atmosfera superior*, la temperatura mínima alcanzable en Celsius (-273,15) y las constantes de calibración de la banda 10, para convertir los datos en valores de temperatura en función de la radiación que llega a los sensores una vez reflejados en superficie.

Los valores de estas constantes igualmente ofrecidos por los metadatos de las imágenes Landsat son para K_1 de 1321.0789 y para K_2 de 774.8853 resultando en la *Ecuación 4* que, de igual modo, se tiene que ejecutar en la extensión de cálculos raster del SIG.

Ecuación 4. *Cálculo de la temperatura de brillo (Bt).*

$$Bt = \frac{774.8853}{Ln \left(\frac{1321.0789}{L\lambda} + 1 \right)} - 273.15 \quad (4)$$

Una vez obtenido el mapa raster de *Temperatura de brillo (Bt)* procedimentalmente se debe continuar encontrando los valores derivados para la vegetación NDVI.

El NDVI se define como la proporción encontrada entre la diferencia de los valores de píxel de la banda del infrarrojo cercano (banda 5), la banda del rojo (banda 4) y su suma (USGS, 2022) como se muestra en la *Ecuación 5*.

Ecuación 5. *Ecuación de cálculo para el valor NDVI.*

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (5)$$

Este factor es una medida que representa el verdor y la densidad de la vegetación presente en un área. Además, relaciona un valor para cada píxel que se encuentra entre -1 y 1, indicando su correspondiente vigorosidad con valores de poco verdor cercanos a -1 y de vigorosidad y verdor a 1, que vienen directamente relacionados a la cantidad de agua presente en el subsuelo y superficie (Ping, 2020).

El siguiente paso una vez calculado lo anterior es obtener la *proporción de vegetación* (P_v) (Ecuación 6) de cada uno de los píxeles del NDVI obtenido, la importancia de este valor radica en que el P_v puede representar los valores en superficie de humedad y la cantidad de vegetación en un área en particular. Esto se logra realizando el siguiente cálculo con los valores máximos, mínimos y el propio NDVI de las imágenes:

Ecuación 6. Ecuación para el cálculo de la proporción de vegetación (P_v).

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{Min}}{NDVI_{Max} - NDVI_{Min}} \right)^2 \quad (6)$$

Habiendo obtenido la *proporción de vegetación* (P_v), se calculan los valores de la *emisividad* (e) mediante la Ecuación 7.

Ecuación 7. Cálculo de la Emisividad (e).

$$e = 0.004 * P_v + C_v \quad (7)$$

La emisividad es la capacidad que tiene la superficie terrestre que emitir radiación térmica, todo objeto con temperatura por encima del 0 absoluto es capaz de emitir este tipo de radiación (Liang Li, 2014), por lo que los satélites, con sus sensores de amplio espectro son capaces de captar y utilizar este tipo de radiación para análisis de suelos u coberturas. C_v es un factor de corrección constante que viene en los metadatos de la imagen equivalente a

0.986 y que representa el coeficiente de vegetación mediante el cual ésta, utiliza el agua disponible para transpirar por las hojas (Zahir, 2020).

Seguidamente se hallaron los valores correspondientes a la *Temperatura Superficial del Suelo* (LST), que se logra, como se observa en el esquema metodológico en la *Figura 2*, uniendo los resultados obtenidos a partir de la banda térmica y las bandas del infrarrojo cercano y el rojo, dígase de la *temperatura de brillo* (BT) y la *emisividad* (e) mediante la *Ecuación 8*.

Ecuación 8. *Cálculo de la temperatura superficial del suelo (LST).*

$$LST: Bt * \left(1 + 10.8 * \left(\frac{Bt}{14380} \right) \right) * \ln(e) \quad (8)$$

Correspondiendo 10.8 y 14380 a las constantes de calibración de longitud de onda para la banda 10 de Landsat.

Finalmente, el *índice de humedad superficial del suelo* (*Ecuación 9*) se halla de manera similar a la *proporción de vegetación*, utilizando los valores máximos y mínimos obtenidos del tratamiento de la *temperatura superficial del suelo*.

Ecuación 9. *Cálculo del índice de la humedad superficial del suelo (SMI).*

$$SMI = \frac{LST - LST_{Min}}{LST_{Max} - LST_{Min}} \quad (9)$$

Con los mapas generados en los dos periodos correspondientes (Poca lluvia y lluvioso), el siguiente paso fue delimitar propiamente las zonas húmedas con las áreas de cambio. Dado que los mapas de humedades por separado no delimitan por sí solos ninguna zona, debido a que no muestran cambios sino un momento puntual de la humedad en el día de la adquisición de las imágenes. Se tuvo que realizar la siguiente metodología planteada por el *autor* con las dos imágenes para obtener las zonas de cambio:

1. Reclasificación de los valores continuos raster (cada uno de los píxeles) obtenidos en 4 clases: A, B, C y D.
2. Conversión de estas 4 reclasificaciones raster en polígonos mediante la herramienta *Reclassify* del SIG.
3. Realizar una eliminación de los polígonos con áreas menores al área mínima cartografiable. Para el caso de un mapa escala 1:50.000 es de 4 hectáreas (IGAC, 2014).
4. Con los dos mapas homogenizados, realizar una unión entre los dos shapes mediante la herramienta *Union* para intersecar cada una de las 8 clasificaciones (4 por mapa).
5. Cruzar los datos de tal manera que se pudieran asociar las zonas de cambio de una clasificación de polígonos a otra.

Con base en esta información se hizo una comparativa de hacía qué valor pasaban las reclasificaciones de febrero al llegar agosto, es decir, en qué valor se convertían.

Una vez con estos valores de cambio identificados por el SIG, se procedió a utilizar un método de interpolación para dar la demarcación final de las zonas húmedas del área de estudio.

6.3. Elaboración mapa multitemporal

El mapa multitemporal se desarrolló con exactamente el mismo procedimiento del mapa de definición y delimitación de zonas húmedas hasta el punto donde se encuentra el *índice de humedad superficial del suelo SMI*, pero con años distintos para poder analizar los cambios acontecidos a lo largo del tiempo y su relación con la precipitación; estos cambios se analizaron de manera secuencial comparando una imagen respecto a otra.

Para poder estimar de manera lo más precisamente posible las áreas con mayor o menor cantidad relativa de humedad superficial del suelo se decidió realizar 5 clasificaciones en cada imagen obtenida sobre los valores continuos de 0 a 1 del SMI. Se dividió en rango de las clasificaciones cada 0,2 puntos de humedad partiendo de 0.0 hasta llegar a 1; esto con el fin de poder comparar y analizar el cambio, si había algún tipo de secuencialidad y poderla asociar a los datos de precipitación del respectivo año hidrológico.

En la *Tabla 2* muestran las únicas imágenes que se obtuvieron de todo el repositorio Landsat que cumplía con las condiciones mencionadas en el capítulo (6.1) desde que se envió la misión en el año 2013.

Tabla 2.

Fechas de adquisición de las imágenes Landsat 8 del mapa multitemporal.

Año	2014	2016	2017	2019	2020	2023
Fecha adquisición	Dic-25	Ene-16	Dic-20	Feb-25	Nov-1	Ene-23

Una vez desarrollado este proceso de obtención y reclasificación, se siguió a calcular el área ocupada por cada clasificación dentro de las imágenes utilizando los píxeles. Para el caso de las bandas térmicas de Landsat, estas cuentan con una resolución de 100 x 100 metros equivalentes a 10.000 metros cuadrados, y, conociendo el número de píxeles por clasificación y multiplicándolo por este valor en metros cuadrados se pudo obtener el área total de cada zona (*Ecuación 10*). Pudiendo así valorar las imágenes que tenían áreas más extensas las zonas de mayor humedad y de menor humedad.

Ecuación 10. *Cálculo del área abarcada por cada clasificación según el número de píxeles.*

$$\text{Área en Km}^2 = \frac{10.000 * \text{Número de píxeles}}{1'000.000} \quad (10)$$

Como dato externo se tomó la información de precipitación de los 7 meses anteriores a la toma de la imagen ofrecida por el IDEAM en sus estaciones de precipitación de: La Mesa. Esto con el fin de tener un registro de las lluvias en los años de la toma de las imágenes y revisar si existe algún tipo de asociación, entre la cantidad de lluvias y la cantidad de zonas húmedas del respectivo año hidrológico.

6.4. Validación en campo

La validación en campo se realizó mediante dos salidas de campo en el mes de febrero y marzo del año 2023. Se hizo con el fin de complementar, soportar, ajustar y validar toda la información generada por el proyecto respecto a la delimitación de los polígonos de suelos y de zonas húmedas en trabajo de oficina. La metodología utilizada en campo es la que se presenta en la *Tabla 3*; en cada estación se tomó información la cual posteriormente serviría para complementar y enriquecer los datos del mapa de suelos y el mapa de humedades.

Tabla 3.

Metodología planteada para adquisición de datos en campo.

Metodología para campo	Datos		
Toma de punto en el mapa	X:	Y:	Z:
Descripción del punto	Tipo de afloramiento:		
Registro fotográfico	Número de fotografía:		
Hay o no desarrollo de suelo	Si:	No:	
Piedra / Roca superficial	Si:	No:	
Tipo de textura del suelo	Arenosa:	Limosa:	Arcillosa:
Color del suelo	Tipo de color:		
Porcentaje de cobertura	< 50%	51 - 74 %	> 75%

6.5. Elaboración mapa de suelos

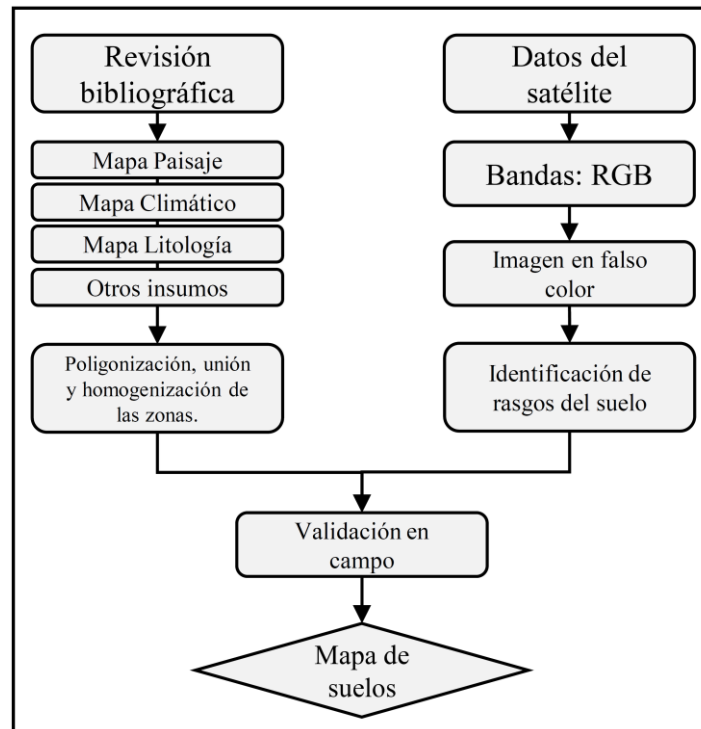
Siguiendo los lineamientos propuestos por el IGAC para la cartografía de suelos en Colombia (IGAC, 2014), la metodología de (Jaramillo D. F., 2002), los lineamientos para cartografía de suelos de la (USDA, 1999); entre otros (IDEAM, 2007; Chuvieco Salinero, 2008; Zinck, 2012). Se realizó un mapa cartográfico de los suelos de La Mesa de Los Santos en un área de 417 km² de extensión. Para esto, se siguió de manera general el siguiente esquema metodológico planteado por el proyecto (*Figura 3*).

Para la cartografía de suelos se utilizaron los 3 factores fundamentales que dan origen a los suelos según las metodologías dadas por el (IGAC, 2014) (USDA, 1999) (Jaramillo D. F., 2002). Estas son: El paisaje, el clima y la litología; que vienen de asociados a la geomorfología, la temperatura y la geología de la zona respectivamente. Estos factores tienen controles secundarios como las pendientes, la erosión y la roca superficial encontrada en campo (UIS, 2011).

Dentro de las características físicas que se consideraron en el estudio de los suelos, se destacaron el paisaje y la litología (Jaramillo V. , 2010). Así mismo se tuvo en cuenta que en unidades cartográficas con características similares el contenido de agua puede variar, ya que se pueden presentar variaciones en su pendiente, en la orientación de las laderas o en la cantidad de radiación solar que reciben durante el día, por lo cual se hace necesario incluir los rasgos geomorfológicos y climáticos de la zona (Jaramillo V. , 2010). En la *Figura 3* se presenta el procedimiento metodológico utilizado para llegar al mapa de suelos.

Figura 3.

Esquema metodológico planteado para la elaboración del mapa de suelos.



La etapa inicial consistió en la revisión bibliográfica de la cartografía temática del departamento de Santander y del municipio de Los Santos (UIS, 2011), (Serrato, 2006) (y anteriores EOT). Dentro de los datos encontrados se obtuvo información geomorfológica de la publicación de (Moreno & Silva, 2021) que permitió obtener los datos de relieve geomorfológico con lo que se pudo derivar el paisaje, mediante la asociación dada por los códigos para el levantamiento de suelos del (IGAC, 2014). Esto permitió asociar las unidades geomorfológicas con los 5 tipos de paisajes presentes en el área de interés. Dentro de esta revisión también se obtuvo la información ofrecida por las distintas estaciones pluviométricas en los municipios aledaños que posteriormente permitirían generar el mapa climático; también la información de la geología realizada por (INGEOMINAS, 2010) y demás repositorios externos.

Para el mapa de climas (*Apéndice A*) se siguieron los lineamientos dados por la clasificación utilizada por el (IGAC, 2014) y adaptada de la metodología de Caldas-Lang. En la cual se clasifica el clima dependiendo de los valores de: altura, temperatura y precipitación anual. De estos insumos para la generación del mapa de climático se pudo identificar como fundamentales la altura, de la cual se puede derivar el piso térmico o la temperatura general de una zona según (IGAC, 2014) y la precipitación. Esta última se encontró por medio de las estaciones pluviométricas puestas en los municipios aledaños a Los Santos, estas corresponden a Palo Gordo, Llano Grande, La Granja, Zapatoca y Cepitá. Una vez obtenidos estos insumos; en el sistema de información geográfica se generó un mapa de isoyetas (*Apéndice G*) mediante los puntos de ubicación de las estaciones y el registro promedio de lluvias para cada punto. Con el mapa de alturas se generó el mapa de pisos térmicos que, una vez poligonizados se procedió a superponerlos y a reclasificarlos según la guía metodológica del (IGAC, 2014).

Posterior a esto y buscando obtener la información más reciente del relieve, se tomaron como base los datos generados por el trabajo de (Moreno & Silva, 2021) en el cual se realizó, entre otros, un estudio geomorfológico para la zona de La Mesa de Los Santos, la cual contaba con un nivel de detalle escala 1:25000, idónea para el trabajo de suelos.

Para esto también se siguió la metodología del (IGAC, 2014), mediante sus *códigos para el levantamiento de suelos* en el cual se clasifican los paisajes según 6 grandes grupos dependiendo de la geomorfología: Altiplanicie (A), Lomerio (L), Montaña (M), Piedemonte (P), Planicie (R) y Valle (V). La asociación de la geomorfología a paisaje se realizó asociando cada una de las 27 subunidades geomorfológicas obtenidas por (Moreno & Silva, 2021) a

cada uno de los paisajes según los lineamientos de los códigos tal y como se indica en la *Tabla 4*.

En el caso del material parental del suelo, que viene dado a través de las distintas litologías de la zona se optó por tomar la geología generada por el equipo de (INGEOMINAS, 2010) debido que cuenta con los datos más recientes y precisos que se tienen de la zona.

Esto se hizo clasificando las distintas litologías en 9 diferentes grupos con una nomenclatura presentada en el *Apéndice C*: Aluviales, Derrubios, Areniscas, Areniscas con Conglomerados, Lutitas, Lutitas con Areniscas, Calizas con Areniscas y Calizas con Arcillolitas y Areniscas con las sedimentarias; haciendo referencias a las metamórficas están los Esquisto y por las Ígneas los Granitos.

Por último, los demás insumos fueron generados con base en las demás metodologías mostradas en la *Tabla 4* y organizacionalmente como se muestra en la *Figura 4*.

Para la generación del mapa de pendientes (*Apéndice D*) se usaron los datos de los *modelos digitales de elevación* DEM por sus siglas en ingles.

En el mapa de erosión (*Apéndice E*) se utilizó la metodología de (Van Zuidam, 1985) que utiliza de base la *cobertura* sumada a las *observaciones* que se realizaron en campo.

Para el mapa de roca superficial (*Apéndice F*) se hizo con base en observaciones y descripciones de campo e imágenes satelitales, apoyado por las pendientes.

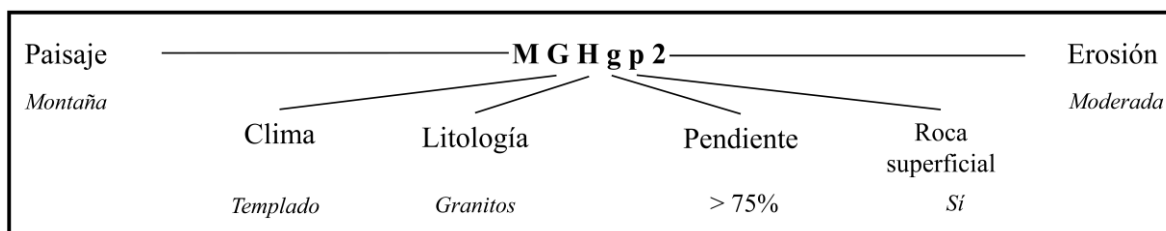
Tabla 4.

Insumos generales y sus clasificaciones para la generación del mapa de suelos.

INSUMOS	NOMENCLATURA	BASE METODOLÓGICA
Paisajes	Altiplanicie (A)	Códigos para el levantamiento de suelos (IGAC, 1998).
	Lomerío (L)	
	Montaña (M)	
	Piedemonte (P)	
Climas	Planicie (R).	Tomado (IGAC, 2014) y modificado de Caldas-Lang.
	Cálido (X)	
	Templado (Q)	
Unidades litológicas	Frío (L)	INGEOMINAS (2010).
	Aluviales (A)	
	Areniscas (B)	
	Areniscas – Conglomerados (C)	
	Calizas – Arcillolitas – Areniscas (D)	
	Calizas – Areniscas (E)	
Pendientes	Esquistos (G)	Rango de pendientes del IGAC (1998).
	Granitos (H)	
	Lutitas (I)	
	1-3% (a); 3-7% (a); 7-12% (a); 12-25% (a); 25-50% (a); 50-75% (a); >75% (a).	
Grados de erosión		A partir de observaciones realizadas en campo y el mapa de coberturas de (Moreno & Silva, 2021) usando la metodología de Van Zuidam (1985). De acuerdo con el porcentaje de cobertura vegetal. >75 Erosión Baja (ligera); 50-75% Media (Moderada) y 0-50% (Severa).
	Ligera (1); Moderada (2); Severa (3).	
Piedra superficial	En caso de presentarse (p).	Partiendo de las descripciones tomadas en campo y con guía general de las pendientes.

Figura 4.

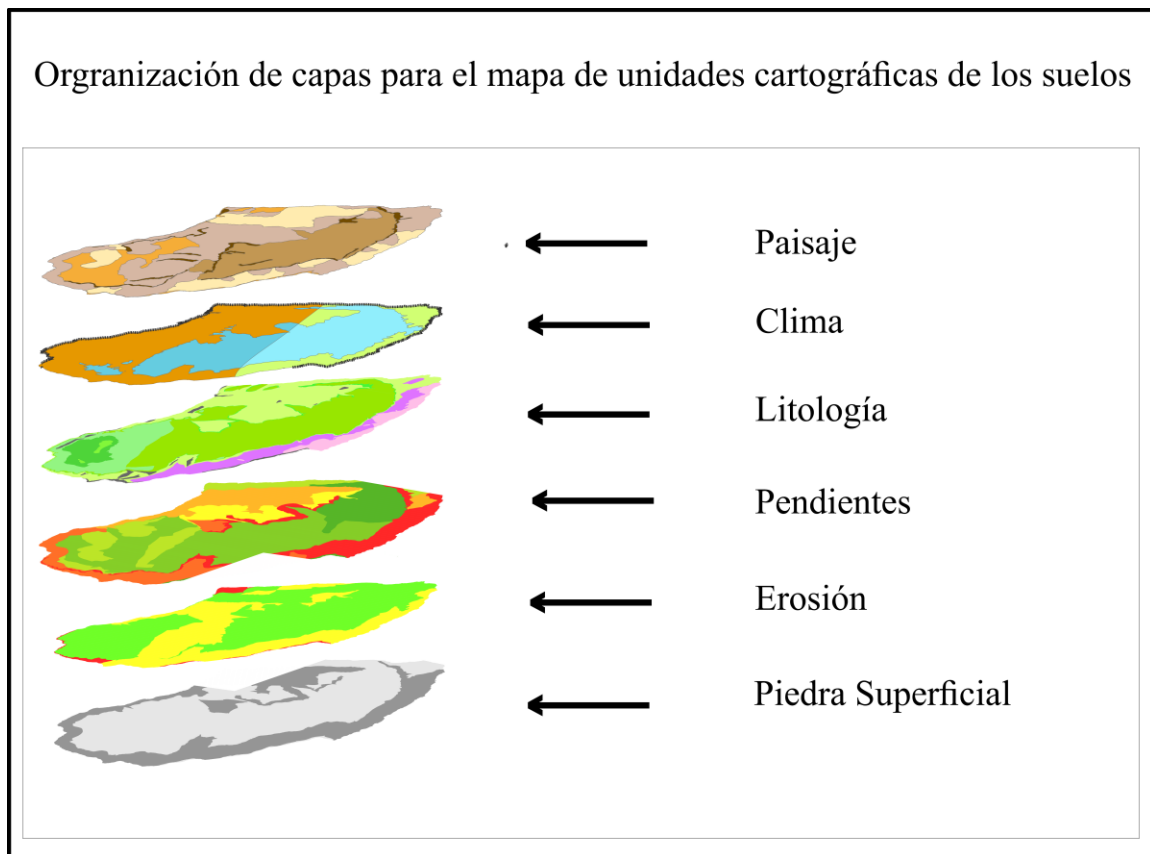
Organización y nomenclatura de las unidades cartográficas de los suelos. Modificado de (IGAC I., 1998).



El mapa de suelos se generó realizando una superposición de las capas base antes mencionadas como se muestra en la *Figura 5*, para posteriormente homogenizar los polígonos con áreas mínimas y las incoherencias que se pudieran igualmente generar a la hora de superponerlos, resultado organizacionalmente de la siguiente manera.

Figura 5.

Esquema de organización de capas en el SIG.



7. Resultados

Los resultados mostrados a continuación se presentan en el mismo orden del capítulo de *métodos y procedimientos* (6). Primero presentando lo obtenido respecto a la definición de zonas húmedas, posteriormente en mapa multitemporal y finalmente los datos obtenidos a través de la validación en campo para generar el mapa unidades cartográficas de los suelos.

7.1. Mapa de zonas húmedas

Con el procesamiento de las imágenes satelitales se obtuvieron los siguientes resultados de valores *NDVI* para los meses de febrero (*Tabla 5*) y agosto (*Tabla 6*) del año 2019, que posteriormente permitieron hallar los valores con los que se realizó el cálculo de la *proporción de vegetación* (*Ecuación 6*) y de la *emisividad* (*Ecuación 7*) como se indicó en el capítulo (6.2) de métodos y procedimientos.

Siendo para el caso de 2019 en febrero valores de:

Tabla 5.

Valores NDVI obtenidos para el año 2019, mes de febrero.

Valores NDVI (Feb-2019)	Dato obtenido
Máximo	0.674121
Mínimo	-0.224616

Siendo para el caso de 2019 en agosto valores de:

Tabla 6.

Valores NDVI obtenidos para el año 2019, mes de agosto.

Valores NDVI (Ago-2019)	Dato obtenido
Máximo	0.668831
Mínimo	-0.25139

Resultando para el mes de febrero en la *Ecuación 11* y para el mes de agosto en la *Ecuación 12*.

Ecuación 11. Cálculo de la porción de vegetación para el mes de febrero 2019.

$$Pv(feb) = \left(\frac{NDVI + 0.224616}{0.674121 + 0.224616} \right)^2 \quad (11)$$

Ecuación 12. Cálculo de la porción de vegetación para el mes de agosto 2019.

$$Pv(ago) = \left(\frac{NDVI + 0.251390}{0.668831 + 0.251390} \right)^2 \quad (12)$$

Los mapas obtenidos del SMI de las *Figuras 6 y 7* proporcionaron un valor estandarizado entre 0 y 1, con 0 representando la mínima humedad del suelo para el día de la adquisición de la información del satélite y 1 para los valores de más alta humedad, estos valores son adimensionales.

Figura 6.

Mapa de distribución de humedades superficiales para el mes de febrero 2019.

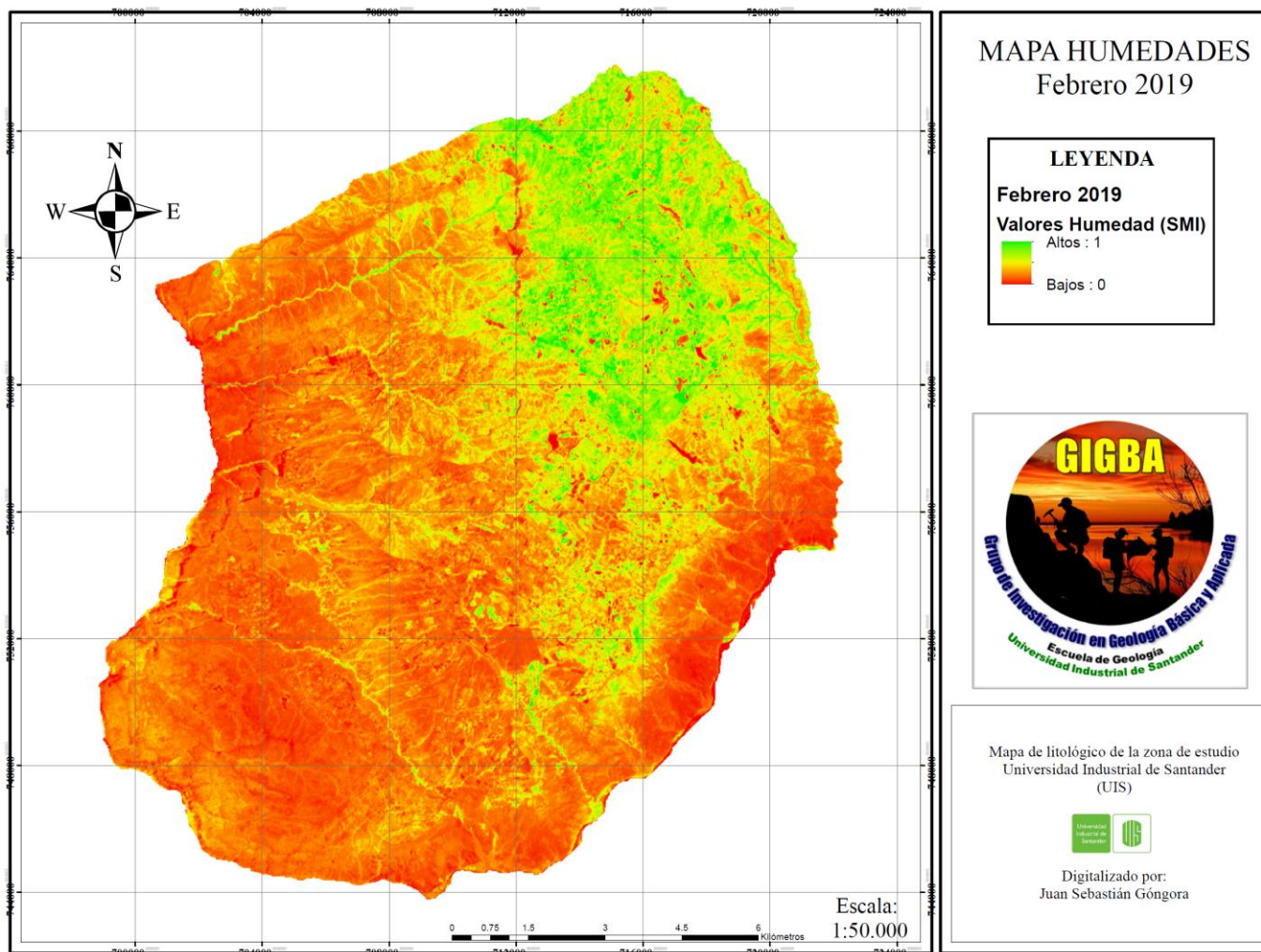
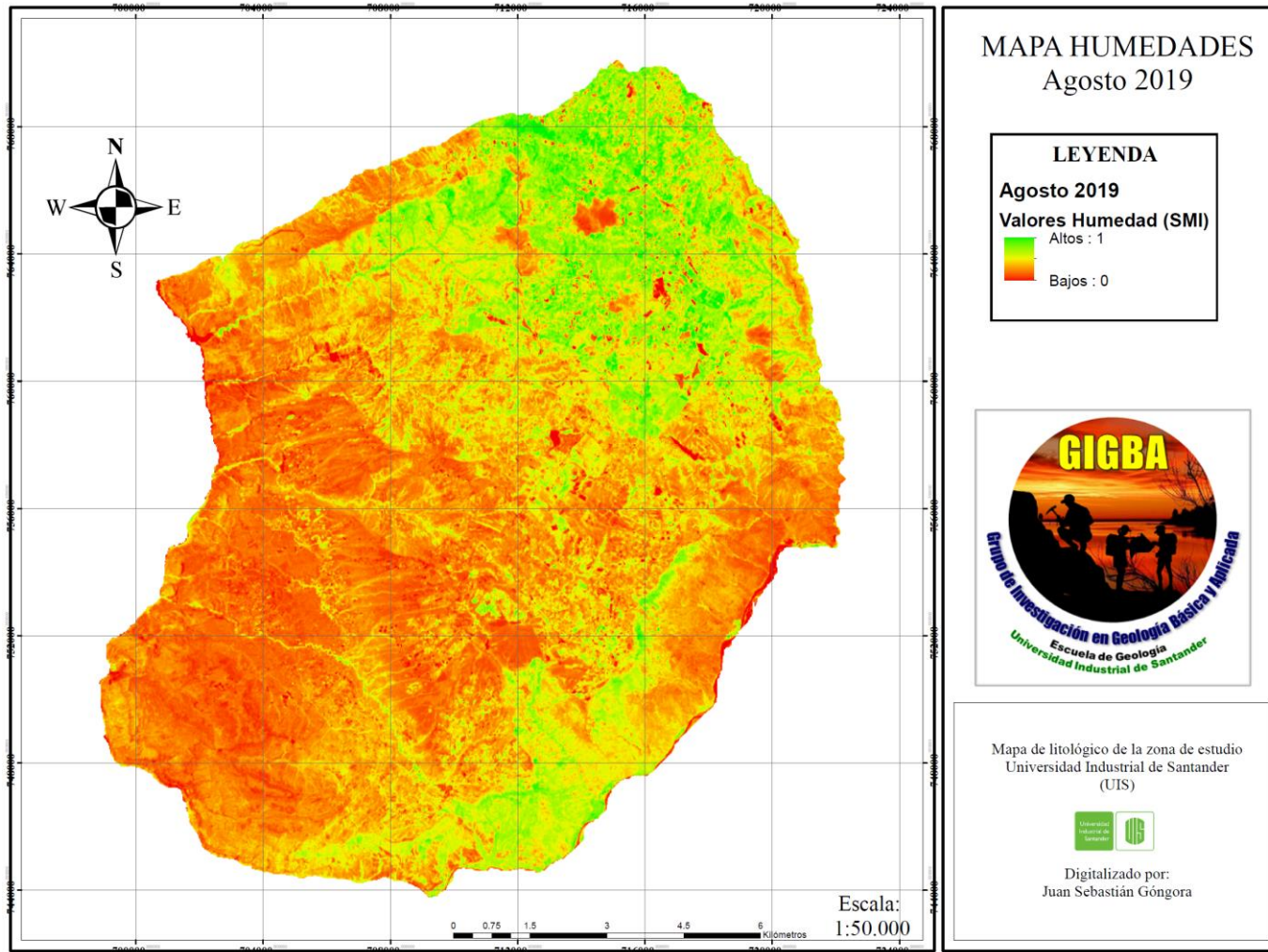


Figura 7.

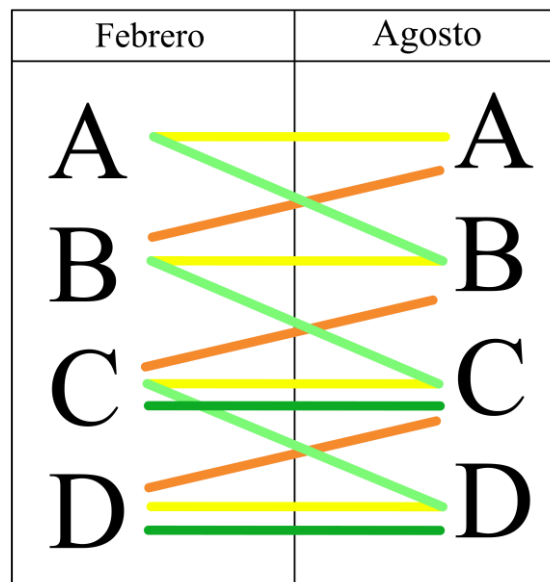
Mapa de distribución humedades superficiales para el mes de agosto 2019.



Retomando la clasificación por letras asignadas en el procedimiento (6.2) para la definición de zonas húmedas, aquí se expresa como aquellos valores que permanecieron en la misma letra se debe a que no variaron en su cantidad de humedad; aquellos que bajaron en la escala 1 letra o más, se debió a que ocurrió un aumento de la vigorosidad o la humedad en ese punto; los que subieron en la escala se debió a que perdieron humedad y; por último, los valores de mayor humedad C y D que se mantuvieron, también se clasificaron como permanentemente húmedos (*Figura 8*).

Figura 8.

Datos cruzados de la información obtenida de humedades entre febrero y agosto de 2019.



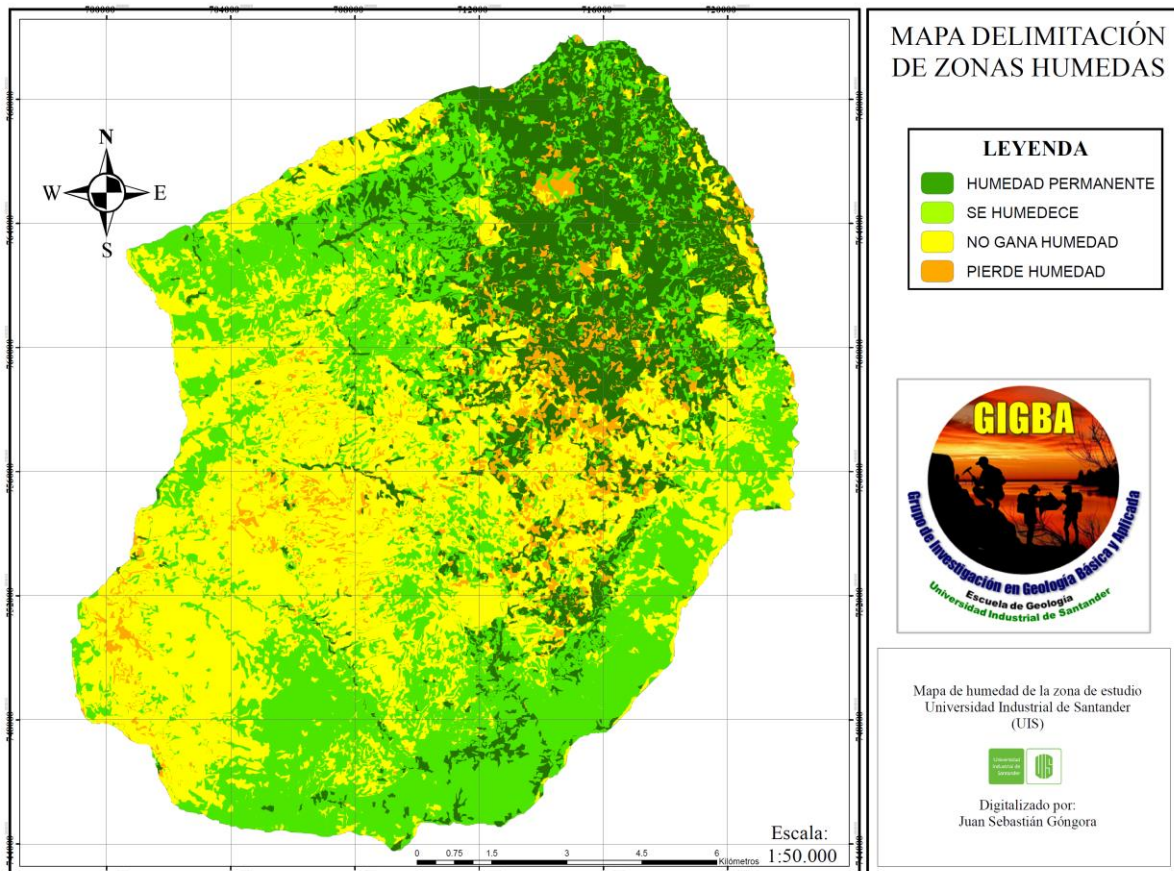
Nota: Las líneas amarillas representan la constancia entre los niveles de humedad de un periodo a otro, Las naranjas aquellas donde hubo algún tipo de pérdida de humedad; que como se puede observar en la Figura 9 únicamente se halla hacia una pequeña zona en el norte; la verde clara donde hubo un aumento en los niveles de humedad con la llegada del periodo lluvioso y las verdes oscuras en donde hubo un mantenimiento de los niveles altos de humedad clasificándose como de humedad permanente.

Como se observa en la *Figura 9* la zona noreste del área de estudio abarcando la totalidad o parcialmente las veredas de El volador, Pajonal, Navarra, El Jazmín, El Recreo, San Javier, San Miguel, La Esperanza, Holanda, Carrizal y los Cacaos es donde hay mayor

relevancia e importancia de las zonas húmedas permanentes, es decir, esta área permanece con niveles de humedad superficial del suelo relativamente altas durante todo el periodo febrero – agosto 2019.

Figura 9.

Mapa de zonas de cambio de las humedades entre febrero y agosto del año 2019.



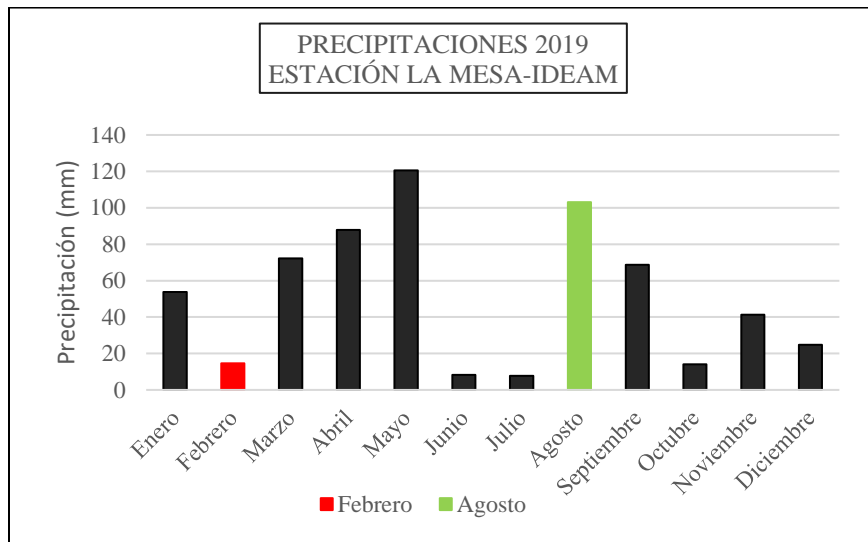
La zona noreste es una zona que se mantiene húmeda a lo largo del año, una hipótesis es debido a que esta zona abarca una precipitación mayor durante todo el año como lo demuestra el mapa de isoyetas generado (*Apéndice G*) con las 5 estaciones de precipitación IDEAM. Además, también hay algunas pequeñas zonas cercanas hacia la Falla La Mojarra en el costado Este que tienden a mantener humedad. Hacia la zona oeste de la mesa los mapas muestran cómo no hay ganancia de humedad, por lo que también se deja planteado la posible

relación que esto pueda tener con la recarga de los acuíferos de la zona. La zona del cañón del río Chicamocha hacía el sur donde se ubica la cabecera municipal de Los Santos y la vereda de La Purnia también sufre un aumento considerable de la vegetación y de la humedad superficial del suelo. El área que rodea y delimita el río Sogamoso no sufre un aumento de la humedad superficial.

A esto también se le pueden añadir los resultados de las curvas de precipitación para el año 2019 (*Figura 10*).

Figura 10.

Precipitaciones del año 2019 en la estación La Mesa.



Nota: La barra verde muestra el mes de adquisición de la imagen en el periodo lluvioso y la barra roja muestra el mes de adquisición del periodo poco lluvioso.

Demostrando así que con la llegada del periodo de lluvias hay un mayor vigor de la vegetación y humedad de las zonas de suelos seco.

Como los mapas de humedades muestran y las curvas de precipitación de la estación pluviométrica del IDEAM La Mesa lo sustentan de manera cualitativa, hacía el periodo de

sequía de febrero hay una pérdida del vigor del área de estudio mientras que, en agosto con la llegada de las lluvias, hay un aumento del vigor de la vegetación.

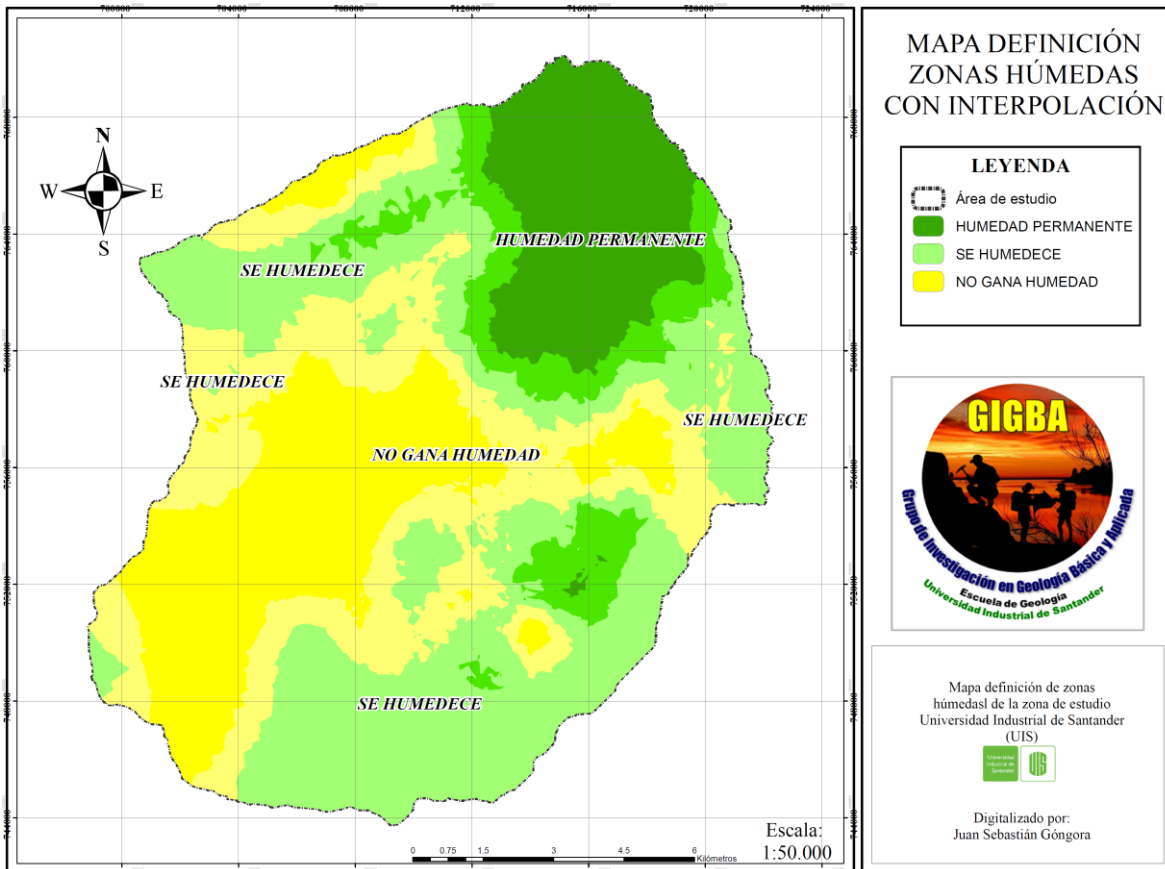
Cabe mencionar que las pequeñas zonas localizadas con pérdida de humedad no se analizaron por ausencia de datos en las imágenes satelitales, que se pudieron ver afectadas por factores externos como la nubosidad.

Sumado a esto también se observa en la *Figura 9* que gran parte de la extensión del área de estudio sufre un reverdecimiento de la humedad con la llegada de las lluvias, sobre todo hacia la zona de drenajes y cañadas es donde se presenta el mayor cambio. La zona central y suroccidental son las únicas áreas que no presentan un reverdecimiento de la vegetación o una humidificación del suelo, no obstante preservan la humedad superficial del suelo.

Por último y buscando obtener una delimitación objetiva y un análisis más cercano a la realidad de lo que son las zonas humedad del área de estudio; una vez obtenido el mapa de polígonos de las zonas de cambio y en vista de que al ser polígonos de muy poca área no representan la totalidad de la zona. Se decidió utilizar un método de interpolación como se muestra en la *Figura 11* con un mallado de puntos distribuidos de tal forma que permitiera al SIG generar una demarcación dada de manera automática con base en estos puntos. Esto en consideración y vista que la delimitación manual pudiera producir sesgos indeseados.

Figura 11.

Mapa de definición de zonas húmedas de la zona de estudio.

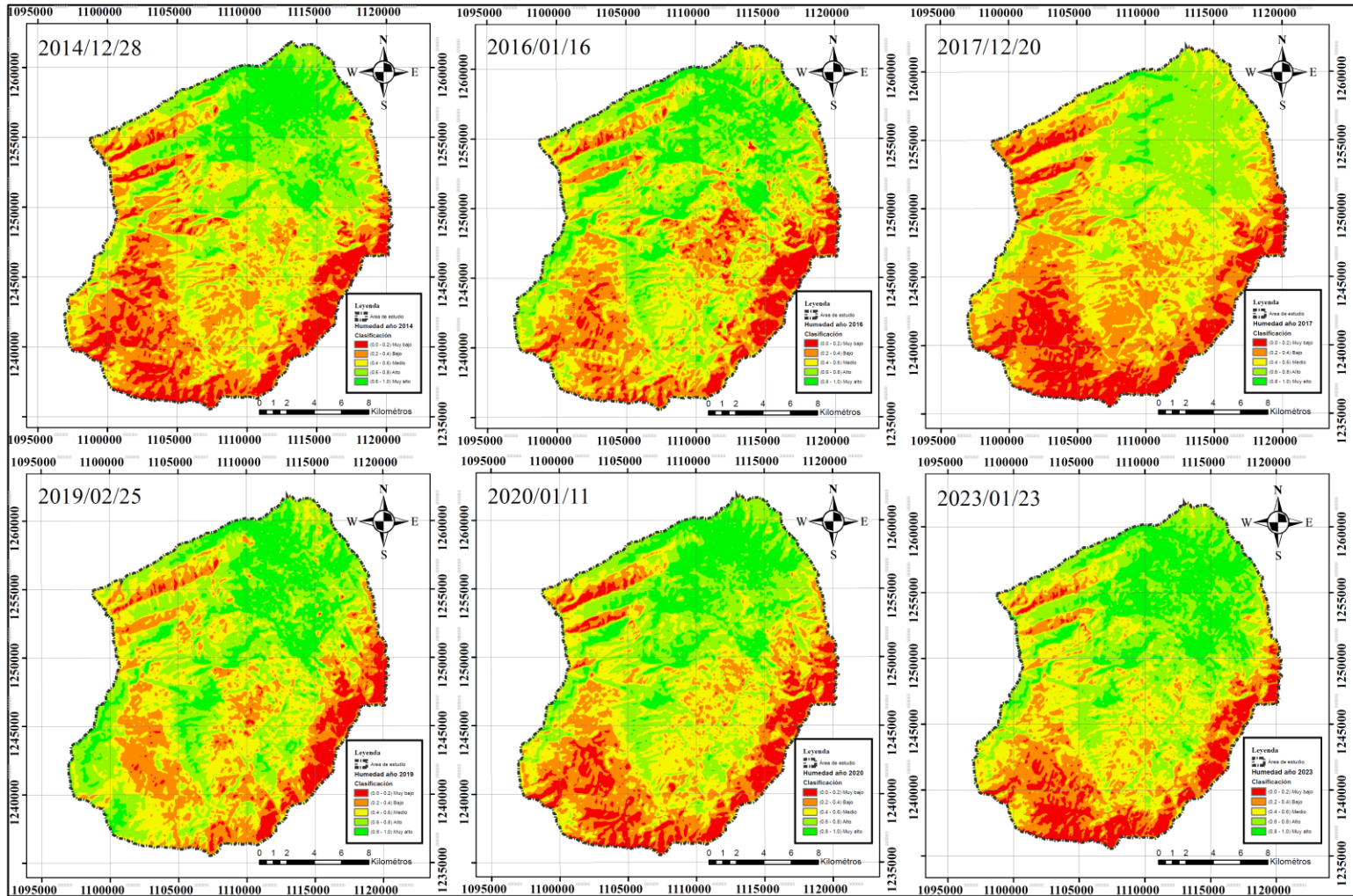


7.2. Mapa multitemporal

A continuación, se muestran los mapas generados del SMI generados para cada uno de los 6 años en la *Figura 12*. Cada uno de estos mapas muestra 5 clases: humedad Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta, donde los valores del SMI varían cada 0.2 puntos de humedad. Estas nuevas clases se generaron a partir de la metodología aplicada en el capítulo de *métodos y procedimientos* (6). Para observar la leyenda revisar *apéndice H*.

Figura 12.

Mapa de distribución de humedades para los años 2014, 2016, 2017, 2019, 2020 y 2023. Nota: Ver leyenda en el Apéndice H.



En la *Tabla 7* se muestra las áreas y el porcentaje que ocupan cada una de las clases de los mapas resultantes para cada año. El área se calcula teniendo en cuenta el número de píxeles que ocupa cada clase (dato que ofrece el *sistema de información geográfica*) y el área total de la zona de estudio (417.29 km²).

Tabla 7.

Distribución en área y porcentaje de cada clasificación para cada año en época poco lluviosa.

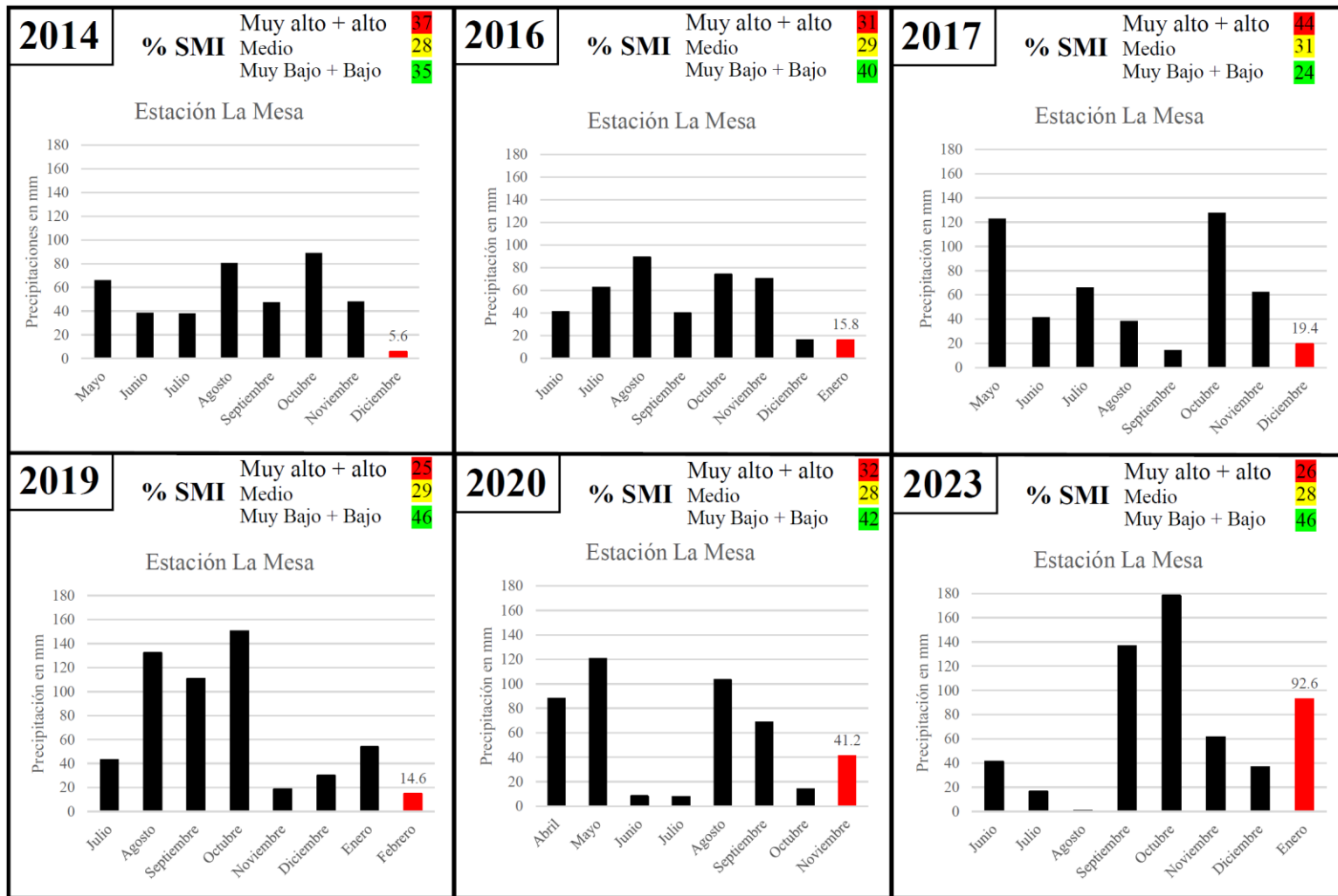
Clasificación	2014		2016		2017		2019		2020		2023	
	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%
Muy baja	49	12	34	8	62	15	24	6	44	11	38	9
Baja	103	25	94	23	122	29	79	19	86	21	71	17
Media	116	28	123	29	131	31	123	29	117	28	116	28
Alta	94	22	108	26	96	23	120	29	104	25	116	28
Muy alta	55	13	58	14	6	1	71	17	66	16	77	18
Sumatoria	417	100	417	100	417	100	417	100	417	100	417	100

Con el fin de poder comparar las zonas de relativamente alta humedad y relativamente baja con relación a las precipitaciones registradas de cada año se sumaron los valores de las clasificaciones en porcentaje Muy bajo y Bajo, y los valores de Muy alto y Alto, dejando a la Medio a modo de dato neutral, dato el cual muestra ni altos, ni bajos niveles de humedad. Obteniendo lo mostrado en la *Figura 13*.

En la *Figura 13* se presenta los valores de precipitación de los 7 meses anteriores a la toma de las imágenes satelitales. Los datos de precipitación se tomaron de la estación del IDEAM La Mesa para los años 2014, 2016, 2017, 2019, 2020 y 2023. La barra roja representa el mes de la toma para cada año correspondiente y se indica el valor de la precipitación de ese mes.

Figura 13.

Relación precipitación para cada año con la cantidad porcentual de zonas vigorosas de vegetación y humedad del suelo.



En la *Tabla 8* se muestran los valores de los porcentajes de humedades relativamente altas y bajas para cada año y las precipitaciones del mes de la toma.

Tabla 8.

Suma de porcentajes de valores de humedad altos y bajos de humedad del suelo para cada uno de los años adquiridos, junto a la precipitación del mes de la toma.

Año	2014	2016	2017	2019	2020	2023
Humedad relativamente baja	36	31	44	25	31	26
Humedad relativamente alta	36	40	24	46	41	46
precipitación el mes de la toma (mm)	5.6	15.8	19.4	14.6	41.2	92.6

Los datos obtenidos sirvieron para asociar cualitativamente las precipitaciones con la cantidad de zonas húmedas planteando lo siguiente: si se tiene mayor cantidad de píxeles en zonas de alta humedad y la precipitación en el mes de la toma de la imagen es superior a 15 milímetros, se podría relacionar de manera coherente la cantidad de humedad superficial del suelo en las imágenes tratadas (el análisis se realiza de modo cualitativo).

Además de esto, también se puede plantear que hay relación, igualmente cualitativa, entre la cantidad de lluvia que cae al norte y nororiente del área de estudio (*Apéndice G*) con las zonas que permanecen húmedas durante todo el año expuestas con anterioridad. Hay que tener en cuenta que la relación entre humedad del suelo y precipitación es más compleja de lo que puede parecer, porque hay que tener en cuenta factores externos como la textura del suelo, la cobertura vegetal y las tasas de evaporación e infiltración (Largaespada & Henríquez, 2015) entre otros.

Buscando posibles asociaciones de cambios de humedad de los distintos años obtenidos y tratados mediante el método de SMI, se pudo establecer que existe una relación cualitativa entre la cantidad de lluvias de los periodos previos a la toma de los productos satelitales y la cantidad de humedad que se aprecia en el terreno. Este resultado va de la mano con el estudio de (Camones Cano, 2015) que relaciona también la humedad del suelo y la cantidad de precipitaciones en los meses anteriores a la toma de datos satelitales. Además, como se puede apreciar en los datos obtenidos, hay una relación cualitativa entre los años 2016, 2019, 2020 y 2023 que poseen mayor cantidad de humedad con valores de SMI cercanos a 1 y el valor de precipitación superior a 15 milímetros relativamente alto del mes de la toma de la imagen.

7.3. Validación en campo

En los 4 días en conjunto realizados se salida de campo se pudo corroborar la relación de la información generada por el SIG y la correspondencia con el terreno. Además, se enriqueció el mapa con información textural que ayudó a mejorar y delimitar los suelos de mejor forma. Añadiéndoles información textural y de colorimetría dotándolos de características propias que el SIG no podría haber dado.

También se tomaron cerca de 55 puntos de campo con la información mostrada en la *Tabla 3* y se levantaron varios perfiles de suelo tomando la información y registro fotográfico para soporte de los distintos tipos de suelos. Esta información fotográfica es la que se muestra en la descripción de las distintas unidades cartográficas. Adicional a esto, se tomaron cerca de 18 muestras de campo que ayudaron con la descripción visual de la granulometría y la coloración, a 6 de estas muestras se les realizó un proceso de secado, molienda y tamizado

con el fin de realizar un análisis DRX para la clasificación de las arcillas. Datos que no serán publicados en este informe.

Además, también se pudo corroborar la delimitación de las zonas húmedas en las que con los datos tomados de cobertura, se usó de soporte para generar los mapas de erosiones y roca superficial, que sin la respectiva salida no hubiesen podido ser generados dado que estos necesitaban de un soporte del terreno.

7.4. Mapa de suelos

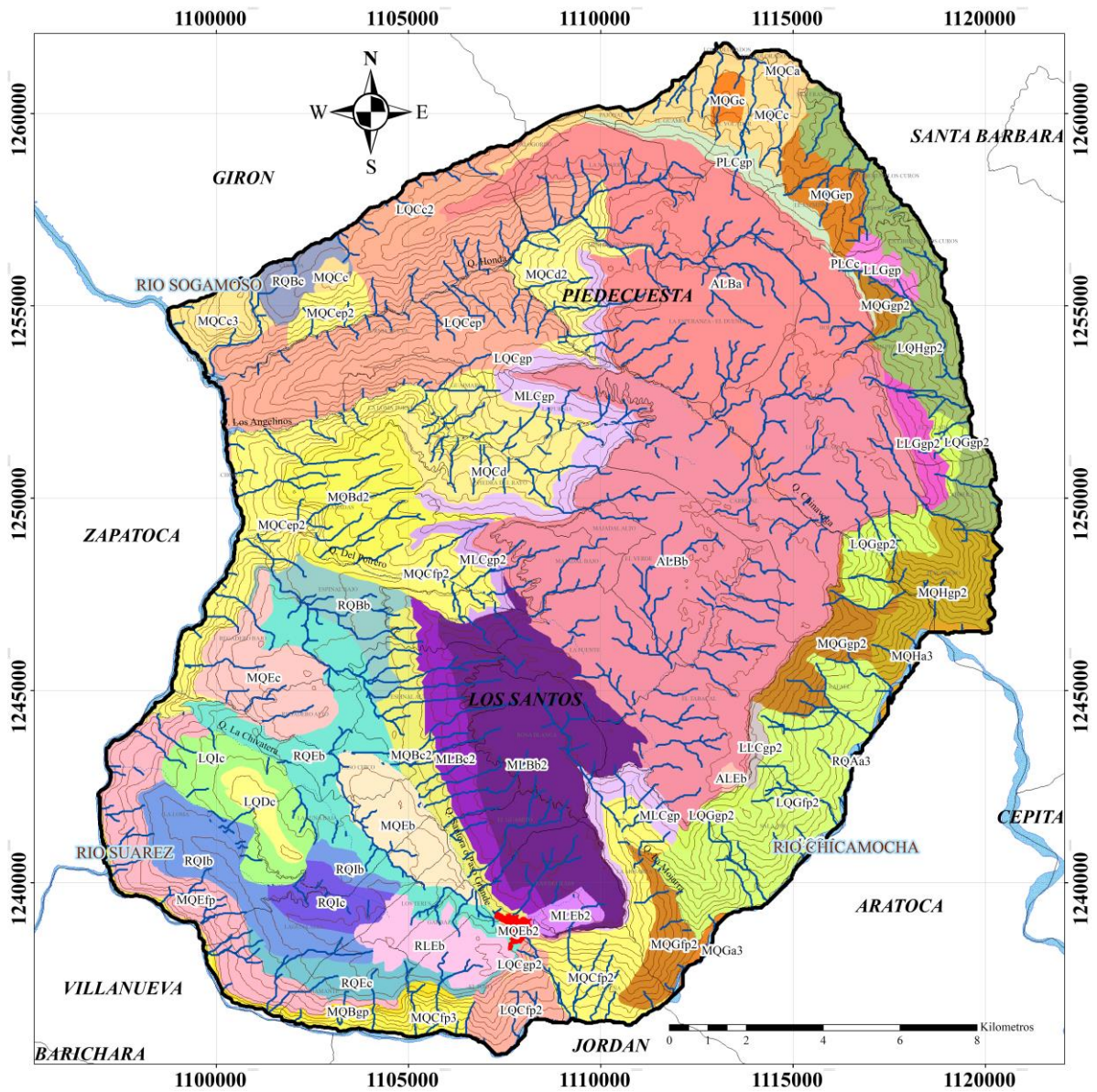
Para el mapa de los distintos suelos presentes en la zona de estudio se realizó teniendo en cuenta sus materiales parentales (litología, geología) , paisajes (geoformas) y climas (Jaramillo D. F., 2002) (IGAC, 2014) (USDA, 1999) con lo que se pudo obtener y clasificar en el siguiente mapa de cartografía básica de los suelos obtenido. Los insumos necesarios para generar la clasificación del suelo corresponden a: mapas de pendientes (*Apéndice D*), de erosión (*Apéndice E*) y de roca superficial (*Apéndice F*), como indica la metodología del (IGAC I. , 1998).

A continuación, se presentan el mapa digital de suelos (*Figura 14*) y los tipos obtenidos de la zona de estudio con sus respectivas clases (*Figura 15*) y la relación de características encontradas en las dos salidas que campo que se realizaron.

Además, se presenta también la leyenda asociada a la información presentada en el mapa de unidades cartográficas de los suelos del sector de la mesa de Los Santos.

Figura 14.

Mapa generalizado de unidades cartográficas de suelos.



Nota: Para simbolos y convenciones ver Figura 15.

Figura 15.

Leyenda del Mapa de unidades cartográficas de los suelos.

Clima	Paisaje	Material Parental	Pendientes	Unidades cartográficas de los suelos		Área (km 2)						
Frío (L)	Altiplanicie (A)	Areniscas (B)	0 - 3%	ALBa	ALBb	109.93						
		Calizas - Areniscas (E)	0 - 7%	ALEb		0.35						
	Planicie (R)	Calizas - Areniscas (E)	3 - 7%	RLEb		5.20						
	Montaña (M)	Areniscas - Conglomerados (C)	3 - 7 , >75%	MLCgp	MLCgp2	12.17						
		Calizas - Areniscas (E)	3 - 12%	MLEb2		1.42						
	Lomerío (L)	Areniscas (B)	>75%	MLBc2	MLBb2	30.67						
		Esquistos (G)	>75%	LLGgp	LLGgp2	3.95						
	Piedemonte (P)	Areniscas - Conglomerados (C)	>75%	LLCgp2		0.75						
7 - 12 , >75%				PLCc	PLCgp	3.28						
Templado (Q)	Montaña (M)	Areniscas (B)	7 - 25%	MQBc2	MQBd2	MQBgp	17.61					
		Areniscas - Conglomerados (C)	0 - 75%	MQca	MQcc	MQcc3	MQca	MQca2	MQcep2	MQcp2	MQcp3	60.39
		Calizas - Areniscas (E)	3 - 12 , 50 - 75%	MQEb	MQEb2	MQEc	MQEfp	26.36				
		Esquistos (G)	0 - >75%	MQGa3	MQGc	MQGep	MQGfp2	MQGgp2	14.86			
		Granitos (H)	0 - 3 , >75%	MQHa3	MQHgp2	8.51						
	Lomerío (L)	Areniscas - Conglomerados (C)	7 - >75%	LQCc2	LQCep	LQCfp2	LQCgp	LQCgp2	37.66			
		Calizas - Arcillolitas - Areniscas (D)	7 - 12%	LQDc		1.87						
		Esquistos (G)	0 - >75%	LQGa3	LQGfp2	LQGgp2	23.19					
		Granitos (H)	>75%	LQHgp2		13.22						
		Lutitas (I)	7 - 12%	LQIc		6.78						
	Planicie (R)	Aluviales (A)	0 - 3%	RQAa3		0.20						
		Areniscas (B)	7 - 12%	RQBb	RQBc	7.84						
		Calizas - Areniscas (E)	7 - 12%	RQEb	RQEc	17.66						
		Lutitas (I)	7 - 12%	RQIb	RQIc	13.27						
							417.29					

ALTIPLANICIE

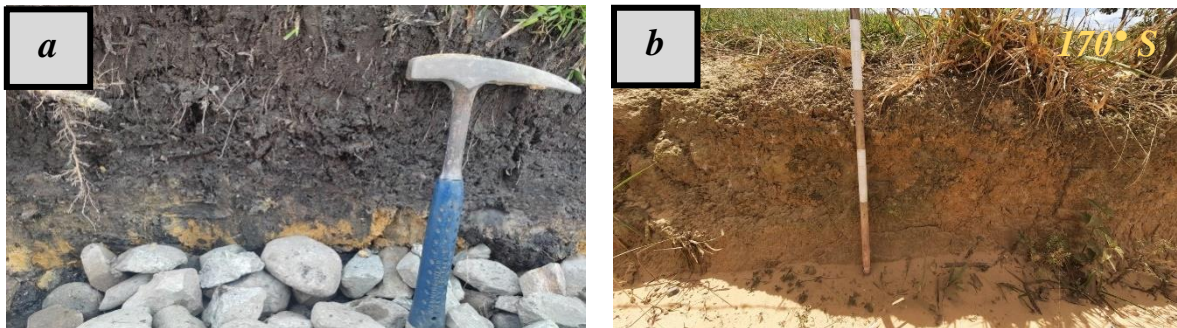
El paisaje de altiplanicie se localiza sobre la meseta estructural definida por (Moreno & Silva, 2021), abarcando una superficie de 99.75 Kilómetros cuadrados equivalente al 24% del área de estudio. Se ubica en el centro de del área de estudio y posee una extensión que llega al norte; cuenta con una altitud promedio de 1650 metros sobre el nivel del mar y debido a la altura y el contexto regional, su superficie se halla mayoritariamente en un clima frío con precipitaciones anuales superiores a los 1100 milímetros de lluvia.

Los suelos de este paisaje son relativamente homogéneos en textura, pero varían en su colorimetría; encontrándose suelos desde colores anaranjados, rojizos, ocre rosa y algunos tonos amarillentos. En su mayoría vienen del material parental arenoso proveniente de la Formación Los Santos, que abarca parcialmente la altillanura dándole sus características geomorfológicas y a su vez sus características litológicas como se observa en la *Figura 16*.

Las unidades de suelo del paisaje altillanura corresponden a los siguientes que son descritos a continuación.

Figura 16.

Unidades de Altiplanicie.



Nota: Unidad ALB (a) y Unidad ALE (b).

- Unidad ALB

Suelos localizados en clima mayoritariamente frío con temperaturas promedio anuales entre los 12° y los 18° grados Celsius con material parental arenoso proveniente de la formación Los Santos. No se presentan de zonas con roca superficial cartografiables. Poseen pendientes que van desde 0 a 7 % produciendo las subunidades ALBa y ALBb. Debido a que la zona en la unidad ALBa permanente húmeda a lo largo de todo el año, se presentan suelos negros muy ricos en materia orgánica y textura Areno-Limosa de entre 10 y 20 centímetros de espesor que se originan debido a la amplia cobertura vegetal asociada a humedales. Aparecen principalmente en zonas deprimidas del terreno o hacia la zona de quebradas de manera discontinua y, además, debajo de estos niveles se encuentran capas arcillas provenientes de la degradación de las areniscas de la formación Los Santos.

- Unidad ALE

Se trata de una zona de 35 hectáreas donde aflora una porción de la formación Rosablanca hacia la vereda el Tabacal, cuenta con un clima frío y pendientes que van desde el 3 hasta el 7% (ALEb), geomorfológicamente se halla ubicado en un escarpe de la meseta estructural y cuenta con suelos provenientes de textura Limo-Arcillosa y tonos anaranjados, con perfiles de suelos que no sobrepasan los 10 centímetros de profundidad y zonas de raíces inferiores a los 2 centímetros.

LOMERÍO

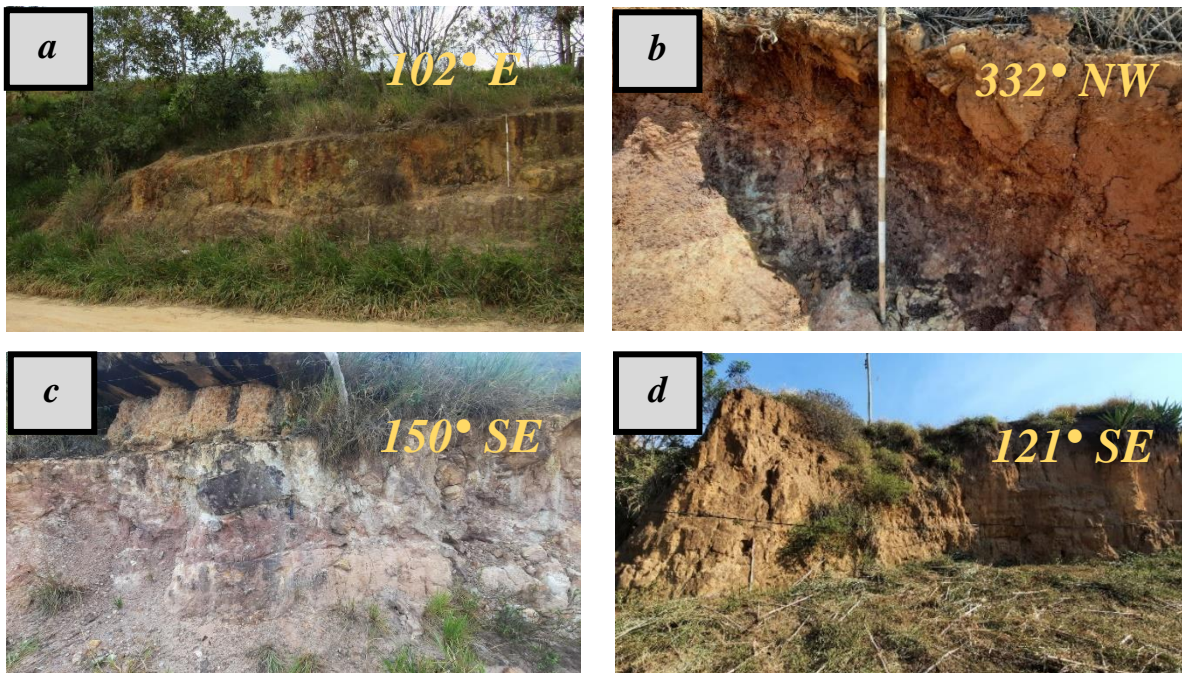
Este paisaje abarca amplias zonas del área de estudio, encontrándose repartidas por diferentes climas y relieves. Abarca distintos tipos de pisos térmicos yendo desde el cálido,

en la zona adyacente al cañón del río Sogamoso, con temperaturas por sobre los 26° Celsius, hasta climas templados y fríos con temperaturas de los 24° a los 12° Celsius respectivamente.

Se ve demarcado por geomorfologías como los lomos desnudos de longitud corta, media y larga. Lomeríos disectados, que se presentan distribuidos a lo largo del área y algunos tipos de conos. La mayoría de sus geoformas se encuentran en climas templados produciendo suelos diversos y, al también contar con una mayor variabilidad de materiales parentales (litologías) distintos (*Figura 17*), genera características diferentes a los suelos de altiplanicie en textura y color. Los materiales parentales van desde las calizas, areniscas, esquistos, arcillolitas y otros más. Ocupa 81.94 kilómetros cuadrados del área de estudio con un 19% de su totalidad.

Figura 17.

Unidades de Lomerío.





Nota: Unidad LLC (a), Unidad LLG (b), Unidad LQC (c), Unidad LQD (d), Unidad LQG (e), Unidad LQH (f) y Unidad LQI (g).

- Unidad LLC

Suelos de textura Areno-Limosa con colores mayoritariamente ocre rosa y con áreas localizadas marrones; cuentan con zonas de raíces de hasta 30 centímetros de profundidad y altos niveles de materia orgánica en el primer horizonte, llegando hasta los 20 o 25 centímetros de los perfiles observados. La zona tiene coberturas de hasta el 50% en densidad provocando que los suelos tengan una erosión de ligera a moderada. El material parental de esta zona está compuesto por areniscas y conglomerados provenientes de la Formación Los Santos. Cuenta con pendientes superiores al 75% y en superficie se aprecian áreas de roca expuesta.

- Unidad LLG

Esta unidad de suelo comprende una extensión de 3.9 kilómetros cuadrados hacia el noreste de la zona de estudio, cuenta con suelos de textura Limo-Arenosa y colores que van desde los amarillos pálidos hasta los anaranjados presentándose en moteados distribuidos en el perfil. No cuenta con zona de raíces que se profundicen en el suelo y la cantidad de materia orgánica es mínima. Los perfiles cuentan con una dimensión entre los 70 y los 80 centímetros de profundidad y las dos subunidades de este tipo de suelo LLGgp2 y LLGgp cuentan con zonas amplias de roca superficial expuesta y erosiones que van desde ligeras hasta moderadas con pendientes superiores al 75%.

- Unidad LQC

Suelos provenientes de materiales arenosos y conglomeráticos de las formaciones Jordán y GirónL, cuentan con texturas arenosas Arenos-Limosas y se presentan hacia el norte del área de estudio abarcando gran parte de las veredas de la Purnia nueva y Chocoa. Hacia el sur también, en inmediaciones a la cabecera municipal de Los Santos. Cuentan con una extensión de aproximadamente 37.2 kilómetros cuadrados del área de estudio y presentan en perfiles de suelos bien desarrollados, con colores rojizos y ocres y zonas de raíces de hasta 5 centímetros de profundidad. Hacia la zona de la Purnia es más común encontrar grandes zonas con roca superficial expuesta y pobre desarrollo de los suelos. Dentro de las subunidades se encuentran zonas de pendientes que van desde el 7% hasta más del 75%, LQCgp; LQCep, LQCgp2, LQCfp2, LQCc2, LQCep.

- Unidad LQD

Unidad de suelo en lomeríos conformada por material parental de calizas, arcillolitas y areniscas provenientes del sector donde aflora la formación Tablazo; produciendo suelos

de tipo Limo-Arcilloso. Únicamente cuenta con una subunidad de pendientes que van entre el 7 y el 12%. Además, no cuentan con zonas amplias de roca expuesta y la cobertura ronda el 70% dejando suelos con niveles ligeros de erosión.

- Unidad LQG

Este tipo de suelos se presenta sobre todo hacía los escarpes adyacentes al cañón del río Chicamocha y el mirador de Pescadero. Cuentan con características arenosas y colores mayoritariamente marrones oscuros hasta anaranjados fuertes y negros; con pendientes que varían desde el 0 al 75% se presentan en zonas de clima templado llegando a frío. En su mayoría tienen extensas áreas con roca superficial y falta de cobertura vegetal lo que favorece la erosión, habiendo zonas con erosiones que van desde moderadas hasta severas. Se presentan perfiles con suelos de hasta 2 metros y medio y la extensión de las subunidades LQGfp2, LQGgp2 y LQGa3 es de aproximadamente 21 kilómetros cuadrados.

- Unidad LQH

Unidad de suelos provenientes de los materiales ígneos del Granito de Pescadero, se presentan con características Limo-Arenosas y colores rojizos a ocre pálidos. Además, cuentan con una erosión moderada debido a la cobertura que se presenta en el área. Están ubicados en una zona de clima templado con geomorfologías de lomos denudados y lomas de longitud larga mayoritariamente. En las zonas de coloración ocre hay áreas con altas cantidades de materia orgánica y sobre todo hacía el norte en los afloramientos donde las precipitaciones anuales son mayores abunda la vegetación. La zona cuenta con pendientes escarpadas superiores al 75%. Abarcan 6.7 kilómetros cuadrados del área de estudio.

- Unidad LQI

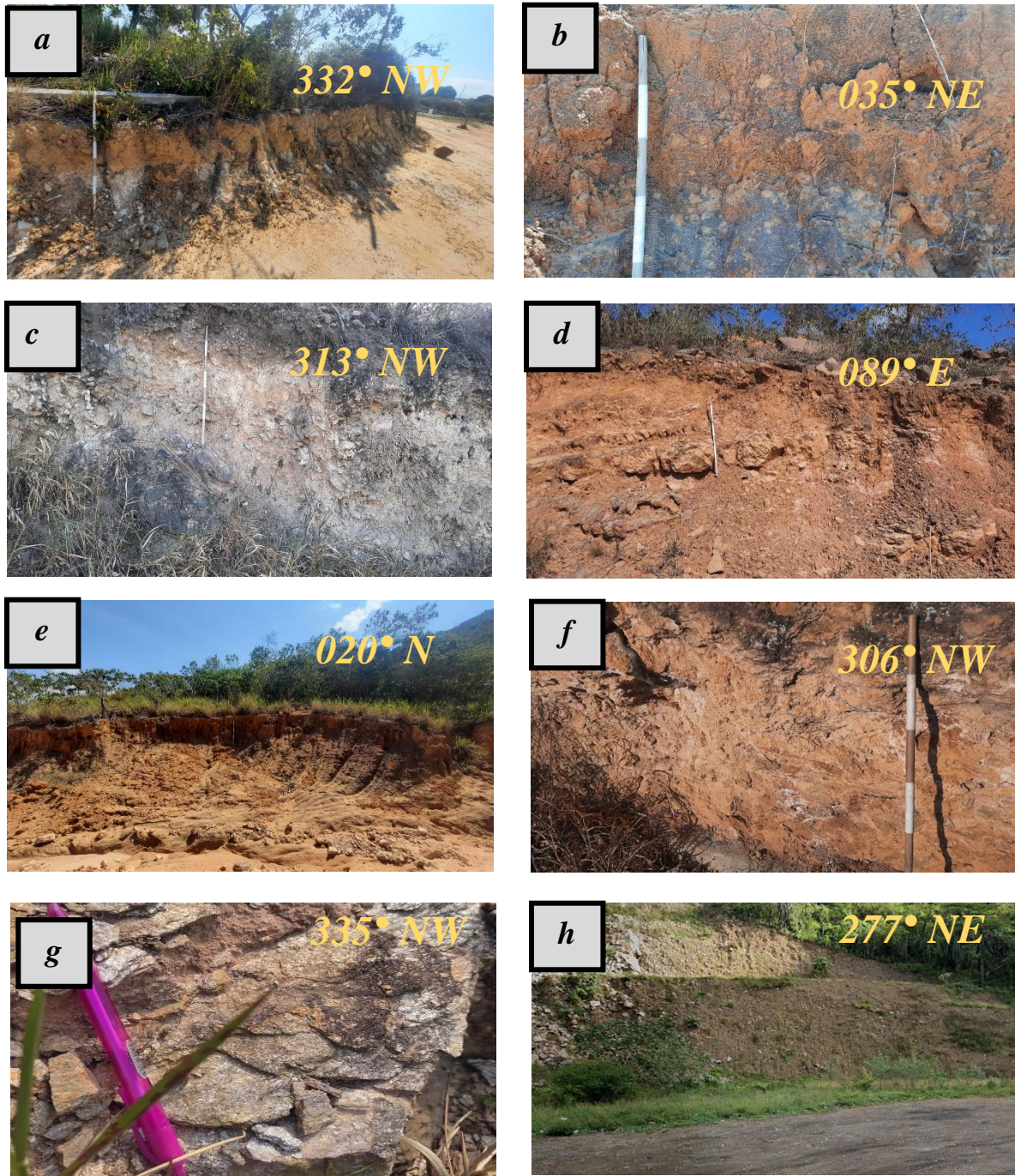
Unidad de suelos con características mayoritariamente Limosas, con zonas localmente de Arenosas. Se presentan como regolitos de limolitas y lutitas de la formación Paja. No se aprecian amplias zonas de importancia de roca superficial expuesta excepto por los cortes de algunas vías presentes. Con pendientes que van desde 7 hasta el 12% y climas templados con precipitaciones que no superan los 790 milímetros anuales.

MONTAÑA

Esta expresión de paisaje abarca alrededor de 171 kilómetros cuadrados de los 417 kilómetros de la extensión del área de estudio, representando el 41%. Este paisaje se presenta distribuido de manera uniforme en el área de estudio exceptuando la meseta estructural de Los Santos. Al contrario que su distribución, las características texturales de los suelos que se presentan son heterogéneas, presentándose desde suelos gravosos hasta suelos con características arcillosas y toda variedad de colores (*Figura 18*). Su expresión se da con variaciones de altura que van desde los 250 metros de altura en el cañón del río Sogamoso hasta zonas con elevaciones de 1680 metros sobre el nivel del mar en áreas cercanas a la meseta. Abarcan prácticamente todas las litologías presentes del área, pero mostrándose sobre todo hacía las zonas donde afloran materiales de areniscas, conglomerados y donde afloran los esquistos del Silgará.

La mayor parte de las expresiones geomorfológicas de montaña aparecen en zonas con clima templado con temperaturas entre los 18 y los 24° Celsius.

Al tratarse de un paisaje montañoso, una parte importante de las zonas delimitadas con esta nomenclatura se presentan con pendientes mayores a zonas de altiplanicies o los lomeríos.

Figura 18.*Unidades de Montaña.*

Nota: Unidad MLB (a), Unidad MLC (b), Unidad MLE (c), Unidad MQB (d), Unidad MQC (e), Unidad MQE (f), Unidad MQG (g), Unidad MQH (h).

- Unidad MLB

Esta unidad cartográfica se presenta en su totalidad en climas fríos, con temperaturas que van desde los 12 hasta los 18° Celsius. Poseen características Arenosas y Limo-Arenosas con colores ocres pálidos a grises y también naranjas y perfiles de 50 centímetros. Hacia el borde sur de la delimitación se presentan zonas distribuidas de roca superficial, algunas producidas por el corte y trazado de las vías y otras por exposición natural. También cuentan con colores marrones y pendientes bajas que van desde 3 hasta el 12%. Cuentan, además, con erosiones moderadas en sus subunidades MBLc2 y MBLb2 debido a una distribución poco uniforme de la cobertura vegetal la cual, no supera el 75%.

- Unidad MLC

Unidad cartográfica con características mayoritariamente Limosas y Areno-Limosas con colores desde los rojizos hasta marrones cobrizos. Se observaron en campo perfiles de hasta 40 centímetros con zonas localizadas de roca superficial que afloraban a los costados del trazado de las vías y de forma natural. Con áreas localizadas de texturas gravosas y matorrales generalizados junto con herbazales de cobertura. Debido a las características del clima frío, las pendientes superiores al 75% y la cobertura; algunas de las zonas se las caracterizó con erosiones moderadas y ligeras. El material parental que dio origen a los suelos de las subunidades MLCg y MLCg2 está principalmente compuesto por areniscas y conglomerados de las formaciones Girón y Jordán. Los suelos de esta unidad ocupan un área equivalente a 9 kilómetros cuadrados.

- Unidad MLE

Esta unidad cartográfica posee suelos con materiales parentales de calizas con niveles arenosos de la formación Rosablanca. Ubicados hacía el suroeste de la zona de estudio y adyacente a la cabecera municipal de Los Santos; los suelos tienen una expresión Areno-Limosa con algunas gravas y perfiles de suelo de hasta 40 centímetros. No se observó un desarrollo muy profundo de suelos ni materiales orgánicos en abundancia. Los tonos ocre rosa predominan en la roca y oscuros marrones en los suelos. En la zona se aprecia una cobertura de hasta el 50% por lo que la erosión es de carácter moderado y no se encuentran zonas amplias expuestas de roca superficial.

- Unidad MQB

Suelos ubicados hacía los escarpes de la formación Los Santos y caracterizados por tener texturas Arcillo-Limosas, con subunidades de alta pendiente como MQBgp y de grado medio como MQBc2 y MQBd2. Tienen zonas localizadas de texturas Arenosas producidas por las areniscas provenientes de la formación Los Santos. Las zonas de raíces tienen un máximo de 15 centímetros de profundidad y se observan áreas de piedra superficial de manera generalizada hacía los escarpes. Los colores varían desde anaranjados hasta los predominantes marrones oscuros. Ocupan un área de 17 kilómetros cuadrados.

- Unidad MQC

Esta unidad cartográfica comprende una amplia extensión presentándose en alrededor de 55 kilómetros cuadrados del área de estudio. Presenta colores ocre pálido pasando por rojizos y cobre. Cuenta en su mayoría con una textura Areno-Limosa con arenas que varían desde las arenas finas a las medias. Debido a que su extensión se halla en climas templados y algunas zonas en climas cálidos, con temperaturas que varían desde los 18° hasta los 24° Celcius, es común la variabilidad en la presencia de agua en las zonas. La humedad varia y

por ende su coloración, por observaciones en campo se apreció que entre mayor cantidad de humedad en el terreno, más oscuros son los suelos presentes. En buena parte de su extensión se encuentran amplias zonas con roca superficial, sobre todo hacia el cañón del río Sogamoso sobre las veredas de Llanadas, Piedra del Yayo, la Purnia y Regadero Bajo. Las zonas de pendiente varían desde el 3% hasta superar el 75% con sus subunidades MQCep2, MQCa, MQCfp3, MQC fp2, MQCc3, MQCd2, MQCc, MQCd2, MQCd.

- Unidad MQE

Suelos presentes sobre todo hacia la región sur del municipio de Los Santos caracterizados por sus colores mayoritariamente marrones, aunque también se presentan grises, rojizos y anaranjados en zonas localizadas. Con texturas predominantemente Arenosas, hay puntos en los que, por las distintas características de sus subunidades, las pendientes y erosión, se presentan suelos Areno-Gravosos, Areno-Limosos y Areno-Arcillosos. Las pendientes varían desde leves del 3% hasta el 75%. Sus subunidades son MQEp, MQEc, MQEb, MQEb2. Se presentan en alrededor de 24 kilómetros cuadrados de la totalidad del área de estudio.

- Unidad MQG

Suelos mayoritariamente rojizos con texturas Areno-Gravosos con coloraciones oscuras predominando los marrones. Esta unidad cartográfica sólo se presenta hacia los escarpes del río Chicamocha en donde afloran los esquistos del silgará, que fungen como su material parental. Se dan en zonas de pendiente alta y con erosiones de ligeras a moderadas. En amplias zonas se encuentra roca superficial expuesta. También al tratarse de una roca dura se dificulta la formación de suelos con distintos horizontes a diferencia de la zona

permanentemente húmeda del norte del área de interés. Ocupan aproximadamente 12 kilómetros cuadrados y su totalidad se hallan en clima templado.

- Unidad MQH

Suelos presentes sobre todo hacia el borde del río Chicamocha, se hallan ubicados en una zona de climas templados rozando los cálidos. Predomina la roca superficial expuesta y los suelos no están bien desarrollados. La cobertura en esta zona del cañón es escasa por lo que la erosión al material parental del granito es muy alta produciendo por lo suelos de características Areno-Gravosas y colores rojizos suaves a marrones.

PIEDEMONTE

Abarcando cerca de 3 kilómetros cuadrados los suelos de piedemonte se localizan hacia los escarpes norte del área de estudio entre la meseta estructural y los miembros medios e inferior de la formación Los Santos. Poseen pendientes altas superiores al 50% y topografías escarpadas. Se encuentran suelos Limosos y Arenosos en climas de características templadas y precipitaciones anuales superiores a los 2000 milímetros, factor el cual mantiene la zona húmeda durante todo el año, ayudando a que se generen suelos ricos en materia orgánica con tonalidades oscuras y colores marrones a negros (*Figura 19*). Además, debido a este mismo factor, la zona húmeda mantiene una cobertura igualmente permanente, por lo que los suelos sufren de una erosión ligera a lo largo de toda su extensión. Cuentan con alturas desde 1350 metros hasta los 1550 metros sobre el nivel del mar con temperaturas templadas desde 18° a los 24° Celsius.

Figura 19.

Unidad de Piedemonte.



- Unidad PLC

Esta única unidad de suelos en zona de piedemonte comprende alrededor de 3 kilómetros cuadrados presentando suelos de tipo Areno-Limoso de coloraciones mayoritariamente grisáceas, con zonas localizadas más rojizas y negras. La humedad acompaña permanentemente todo el año a estos suelos por lo que son ricos en materia orgánica. Al su material parental ser areniscas de la formación Los Santos, miembro inferior, igualmente los suelos derivados son de características mayoritariamente Arenosas con algunos Limos. Sus subunidades son PLCc y PLCgp.

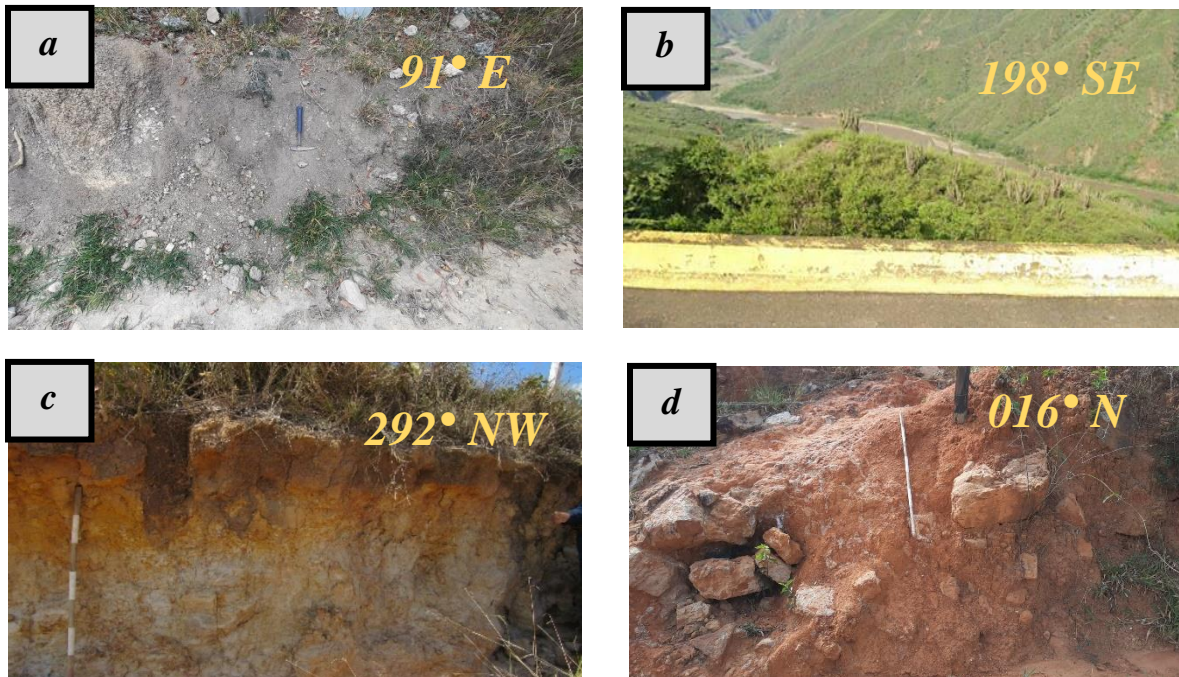
PLANICIE

Con suelos que ocupan alrededor de 37 kilómetros cuadrados de extensión del área de estudio y cerca de un 9% de esta, los suelos de los paisajes de planicies se ubican sobre todo hacía la zona sur y centro del municipio de Los Santos, y una pequeña zona al norte en el municipio de Piedecuesta. Este paisaje se caracteriza en por poseer pendientes suaves las cuales se ubican en climas templados con temperaturas de los 18° a los 24° grados Celsius.

Este paisaje junto a la cobertura además da paso a suelos con niveles generalmente ligeros de erosión y altos niveles de vegetaciones superficiales (*Figura 20*).

Figura 20.

Unidades de Planicie.



Nota: Unidad RLE (a), Unidad RQA (b), Unidad RQB (c) y Unidad RQE (d).

- Unidad RLE

Unidad ubicada hacía el sur del área de estudio en un clima templado y con pendientes entre el 3 y el 7%. Con suelos de textura Limosa y Arenosa, comprende un área aproximada de 5 kilómetros cuadrados. Los suelos provienen de los niveles Arenosos de la formación Rosablanca y se caracterizan por colores grises pálidos y ocre rosa que pueden variar hasta rojizos en zonas con altas humedades. RLEb.

- Unidad RQA

Unidad de suelos producida por materiales aluviales adyacentes al cañón del río Chicamocha en zonas con temperaturas que varían desde los 18° hasta superar los 24° Celsius. Abarcan aproximadamente 200 hectáreas del área de estudio y según observaciones a través de herramientas SIG, poseen colores claros de ocre rosa hasta amarillentos. No se pudo llegar en campo hasta esta zona del área de estudio.

- Unidad RQB

Unidad cartográfica de suelos proveniente de la formación Rosablanca; se caracterizan por texturas Arena-Gravosas de coloraciones amarillentas, ocre rosa y algunas zonas oscuras con material orgánico. Poseen roca superficial y sobre estos afloramientos se encuentran perfiles de suelos de hasta 25 centímetros de profundidad con zonas de raíces de 10 centímetros. Los suelos de esta área se encuentran pobremente desarrollados.

- Unidad RQE

Suelos predominantemente rojizos a anaranjados con perfiles de hasta 50 centímetros de profundidad se caracterizan por sus texturas Limo-Arenosas y zonas con moteados de colores blancos. También presentan erosiones ligeras debido a las coberturas vegetales que superan el 80%. Sumando a esto no se encuentran zonas de perfiles con material orgánico ni altas pendientes. RQEb y RQBc. Rosablanca. Cuentan con un área de *17 km²*.

- *Unidad RQI.*

Unidad de suelos ubicados hacia el sur del área de estudio presentan texturas finas Arcillo-Limosas, entre otros. Debido a su material parental formado de lutitas de la formación Paja, y el contexto de paisaje-clima en el que se encuentran, Poseen colores grises y tonos

ocre rosa con pendientes bajas que van desde el 3 hasta el 12 % y ocupan *12km²* del área de extensión.

8. Discusión

En lo relacionado al tema de las humedades se puede afirmar que estas, en su conjunto, se ven afectadas por variables multifactoriales como puede ser la altura, la geografía, la geología entre otros. En el caso de la mesa tiene afectación directa para las zonas húmedas y las que se humedecen; el tipo de cobertura, la altura y la precipitación promedio anual, y se propone que el tipo de suelos; esto debido a que en un ambiente en el que no hay favorabilidad para la percolación (Moreno & Silva, 2021) es más factible que el agua se mantenga en superficie y no haya una infiltración hacia el subsuelo más rápida, también favoreciendo cierto tipo de vegetaciones más densas, las cuales, necesitan de mayor disponibilidad de agua y de recursos superficiales del suelo.

Respecto a las coloraciones de los suelos y los cambios que estos pueden tener a lo largo de una misma delimitación cartográfica, se plantea que, por cómo se observó en campo y como también sustento (Castañeda Álamo & Herrero, 2009) el cambio de la coloración se puede dar debido a factores de humedad del mismo y pequeños cambios texturales que poseen los suelos a lo largo de sus extensiones, esto no significa que haya una varianza en los mismos, sino que hay algunos factores que ayudan a diferenciarlos. Como también se pudo observar en campo, hubo zonas con distancias mínimas en la que la coloración de los suelos variaba debido a la presencia de humedad, que al aumentar esta, los colores tendían a ser más oscuros como se observa por ejemplo en la unidad MGC con su registro fotográfico, por encima de los suelos secos amarillos, por debajo se encuentra el mismo tipo suelo con

una coloración completamente distinta debido al oscurecimiento por humedad. Esto se podría ver influenciado también por las distintas pendientes de las unidades de los suelos, al tener mayor pendiente es posible el tránsito del agua sea menor y se dé el tiempo necesario para la infiltración, mientras que en zonas de pendientes planas el agua al permanecer un mayor tiempo la zona podría infiltrarse con mayor facilidad.

Otro punto a tener en cuenta es la nubosidad. Las nubes pueden generar problemas a la hora de generar mapas de humedad, esto debido que al ser masas de agua suspendidas en el cielo y poseer por ende reflectividades altas en algunas de las bandas con las que se trabaja el método SMI, producen interferencias a la hora de generar los insumos de humedades, es por esto que se plantea siempre buscar imágenes relativamente limpias y con niveles de humedad inferiores al 1% en la zona que se busque estudiar.

9. Conclusiones

9.1. Mapa de zonas húmedas

Se pudo establecer con el análisis de la información obtenida y generada en la *Figura 11* que no existen zonas de interés cartografiable en las que haya pérdida de humedad con el paso de un periodo de poca lluvia a uno lluvioso. Como cabría esperar, con la llegada de las lluvias hacía de finales de junio, y como demuestra la gráfica de lluvias en la *Figura 10*, las zonas secas tienden a humedecerse y las zonas húmedas tienden a mantener su humedad en toda la extensión del área de estudio. Un factor para tener en cuenta es obtener productos satelitales lo más limpios posibles, sin interferencia de nubosidades, aerosoles ni contaminantes que puedan alterar los datos y lo que corresponde con la realidad del terreno.

En cuanto a la delimitación de las zonas en La Mesa en Los Santos esta se hizo en 3 áreas de importancia. Las zonas que no ganan humedad corresponden al 33,26% del área de estudio ocupando 138.75 Km^2 . Las áreas humedecidas abarcan cerca del 49.07% y una extensión de 204.72 Km^2 . Finalmente, las zonas que se mantienen húmedas durante el periodo febrero – agosto 2019 ocupan una extensión menor, pero de mayor relevancia para futuros estudios con un porcentaje del 17.66% con un área de 73.68 Km^2 del total del área de estudio.

Las gráficas de precipitación para el año 2019 (*Figura 10*) generadas por los datos de la estación pluviométrica La Mesa del IDEAM y los mapas de humedades muestran, hacia el periodo de sequía o poca lluvia en febrero hay una pérdida del vigor vegetal del área de estudio mientras que, en agosto con la llegada de las lluvias, hay aumento del vigor de la vegetación.

9.2. Mapa multitemporal

De acuerdo con los análisis realizados con el mapa multitemporal y el registro de precipitaciones se pudo establecer una relación cualitativa directa entre las épocas de lluvias y la cantidad de vigor vegetal y la humedad superficial del suelo. Se determinó que en los años que hubo una precipitación superior a los 15 milímetros de lluvia en el mes de la toma, había una tendencia de las zonas denominadas como húmedas a ser mayores a las denominadas como secas, por lo que hay una relación directa entre la caída de lluvias y la cantidad de humedad-vigor vegetal en la zona de estudio.

9.3. Mapa de suelos

Se establecieron 23 clases de unidades cartográficas de los suelos con base en los insumos de Paisaje, Clima y Litología (Material parental) en donde los predominantes fueron los suelos de Montaña, ocupando el 41.24% del área de estudio con 172.06 km^2 . Seguidos

por los suelos de altiplanicie los cuales ocupan 110.28 km² del área de estudio con un porcentaje del 26.43%, seguidos por los suelos de lomeríos, ocupando el 20,09% del área de estudio con 87.47 km², los de planicie ocupando 44.19 km² con el 10.59% y finalmente los de piedemonte ocupando 3,28 km² de extensión con el 0.07% del área de extensión.

Dentro de estas 23 clases se obtuvo un total de 61 subunidades distinguidas por características secundarias como diferencia de pendientes; si había o no roca superficial y dependiendo del tipo de erosión encontrada en campo y derivada del mapa de coberturas existentes presentado por (Moreno & Silva, 2021) como muestra la nomenclatura de la leyenda general del mapa de suelos.

Con base en las campañas de campo y las muestras tomadas para observación y análisis, se pudieron relacionar los tipos de suelos esperados con los encontrados en el terreno, variando sus características físicas y texturales de acuerdo con las metodologías tomadas para el desarrollo del proyecto. Además de acuerdo con el mapa de suelos y las salidas se campo, se pudo establecer que, en los suelos predominantes, las características más predominantes son los suelos de coloración oscura y granulometría arenosa. La relación con la humedad consiste que incluso dentro de un mismo tipo de suelo en una misma área, puede haber variación de la coloración de este debido a un factor fundamental; la cantidad la cantidad de humedad, dos suelos iguales pueden variar su coloración únicamente por la presencia de agua en este.

Referencias y Bibliografía

- Ansar, K. (2021). *Characterizing thermal fields and evaluating UHI effects*. ELSERVIER.
- Arguello et al. (2018). *ESTUDIO DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRÁNEO EN LA ZONA SUR OCCIDENTAL DEL MUNICIPIO DE LOS SANTOS, SANTANDER*. BUCARAMANGA.
- Ávila Dávila, L. (2019). *Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias*. Córdoba, Argentina.
- Becerra & Parra. (2016). *BALANCE HÍDRICO PARA ESTIMAR RECARGA POTENCIAL EN LA MESA DE LOS SANTOS Y DIRECCIÓN DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA*.
- Bolun, L. (2016). Estimating Soil Moisture with Landsat Data and Its Application in Extracting the Spatial Distribution of winter flooded paddies. *Remote sensing*.
- Camones Cano, A. H. (2015). *INFLUENCIA DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA RELACION PRECIPITACION-ESCORRENTIA EN LAS CUENCAS DEL ANYA Y MCHIQUE, JUNIN-PERÚ*. Lima - Perú.
- Campbell, J. B. (2007). *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press.
- Castañeda Álamo, C., & Herrero, J. (2009). *Remote Sensing for detection of changes in Gallocanta Lake*. Zaragoza.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). *TELEDETECCIÓN AMBIENTAL, La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia.
- D. Hunt, E. (2009). The development and evaluation of a soil moisture index. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*.

Díaz. (2009). *EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER.*

Engman, E. (1991). *Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture.*

Flórez Duarte, L. J. (2019). *OPTIMIZACIÓN DE LA COBERTURA Y ABASTECIMIENTO DEL SERVICIO PÚBLICO DE AGUA POTABLE EN EL MUNICIPIO DE LOS SANTOS, SANTANDER.* Bucaramanga.

Hernández, J., & Montaner, D. (2009). *Patrones de respuesta espectral.* Santiago de Chile: Facultad de ciencias forestales.

Hoyningen-Huene, W. (2003). Retrieval of aerosol optical thickness over land surfaces from top-of-atmosphere radiance. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH.*

IDEAM, I. (2007). *ESTUDIO GENERAL DE SUELOS Y ZONIFICACIÓN DE TIERRAS DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER.* Bucaramanga.

IGAC. (2014). *INSTRUCTIVO, Códigos para los levantamientos de suelos.* Bogotá.

IGAC, I. (1998). *Estudio general de suelos del departamento de Santander.* Bucaramanga.

INGEOMINAS. (2010). *INTEGRACIÓN GEOLÓGICA E HIDROLÓGICA DEL CENTRO DE SANTANDER.* Bogotá.

Jackson, T. J. (1980). *Mapping Surface Soil Moisture Using Themactic Mapper Data.* Journal of Applied Meteorology.

Jaramillo, D. F. (2002). *INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO.* MEDELLIN: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

Jaramillo, V. (2010). *La selva seca y las perturbaciones antrópicas en un contexto funcional*. México DF.

Jensen, J. (2016). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Education Limited.

Largaespada, K., & Henríquez, C. (2015). *Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo*. San Pedro de Montes de Oca: Scielo.

Liang Li, Z. (2014). Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International journal of remote sensing*, 1-46.

Lopez Montecinos, C. (s.f.). *Fundamentos básicos para la TELEDETECCIÓN*.

Moreno & Silva. (2021). *Identificación de ambientes geomorfológicos y elaboración de un mapa de favorabilidad para la percolación de la zona de la mesa de Los Santos, Santander*. Bucaramanga.

Ping, J. (2020). *Diverse response of vegetation growth to multi-time-scale drought under different soil textures in China's pastoral areas*. Lanzhou: Journal of Environmental Management .

Richards, J. A. (2014). *Remote Sensing Digital Image Analysis; An Introduction* Springer.

Saha, A. (2018). Evaluación e impacto del índice de humedad del suelo en la estimación de la sequía agrícola utilizando técnicas de teledetección y SIG. *MDPI*, 8.

Sánchez Ramos, J. (2021). Uso de sensoramiento remoto, para determinar la temperatura superficial y monitorear el retroceso glaciar del nevado Coropuna – Arquipa. *UNJGB*.

Serrato, P. K. (2006). *Clasificación fisiográfica del terreno a partir de la inclusión de nuevos elementos conceptuales*. Bucaramanga: CIAF.

Sobrino, J. (2001). *TELEDETECCIÓN*.

Suárez, C. A., & Diaz, A. F. (2016). *ESTUDIO PETROGRÁFICO Y ESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN JORDÁN EN SU LOCALIDAD TIPO SOBRE EL ESCARPE SUR DE LA MESA DE LOS SANTOS Y CAÑON DEL RÍO CHICAMOCHA, SANTANDER*. Bucaramanga.

Tajudin, N. (2020). Estimación del índice de humedad del suelo a partir de imágenes Landsat 8 para la predicción y el seguimiento de deslizamiento de tierra en Ulu Kelang, Selangor, Masalia. *Revista internacional de ingeniería eléctrica e informática*.

Tobler, W. (1987). *MEASURING SPATIAL RESOLUTION*. Santa Barbara: University of California.

Tucker, J. C. (1979). *Red and Photographic Infrared Linear Combination for Monitoring Vegetation*. Maryland: Earth resources branch.

UIS. (2011). *Santander 2030, DIAGNOSTICO DIMENSIÓN BIOFISICA AMBIENTAL TERRITORIAL DE SANTANDER*. Bucaramanga: GIDROT.

USDA. (1999). *Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Washington D.C.

USGS. (1 de 12 de 2022). *Servicio geológico de los Estados Unidos*. Obtenido de Earthexplorer: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Van Zuidam, R. (1985). *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*.

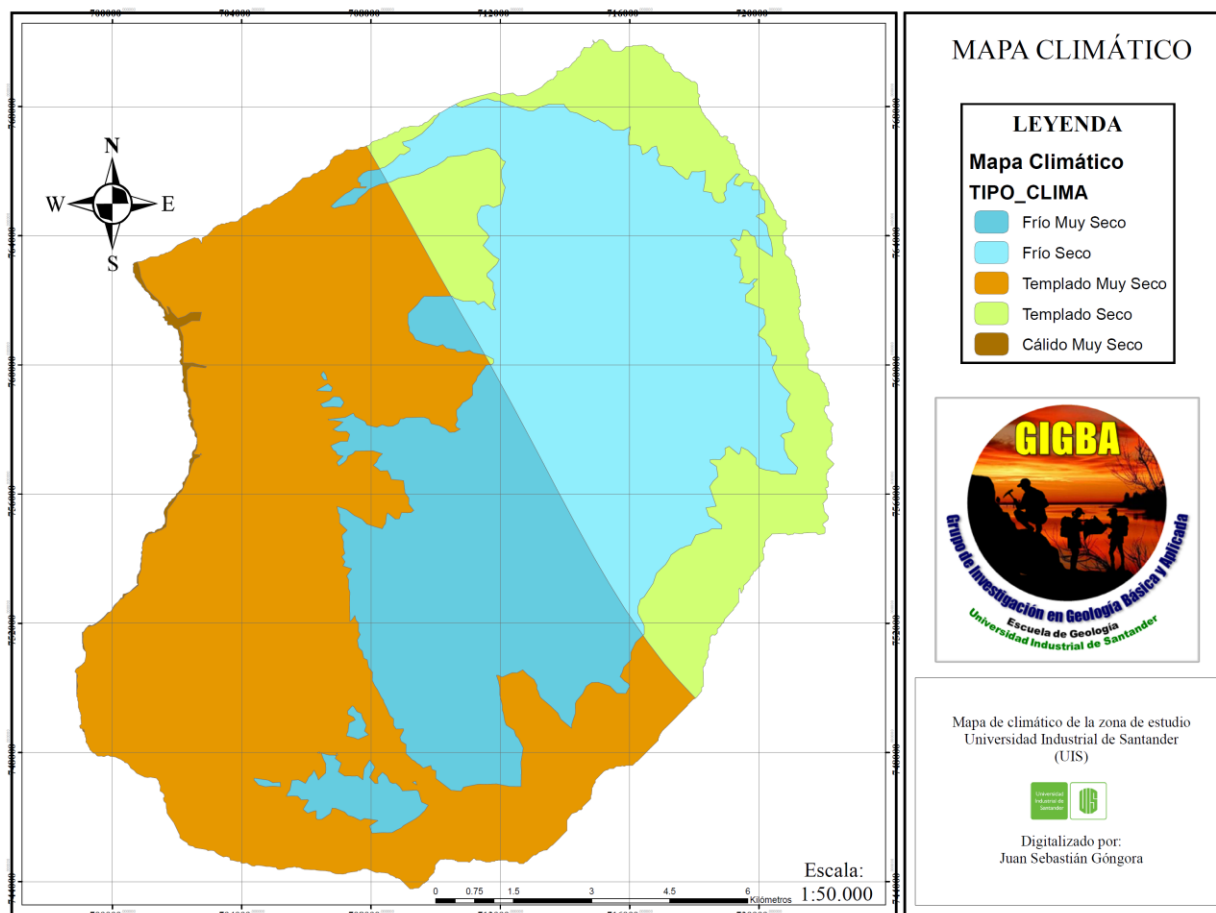
Zahir, I. (2020). *Application of Geo-informatics Technology to Access the Surface Temperature Using LANDSAT 8 OLI/TIRS Satellite Data: A Case Study in Ampara District in Sri Lanka*. Oluvil.

Zinck, J. A. (2012). *Geopedología*. Enschede, Países Bajos: ITC.

Apéndices

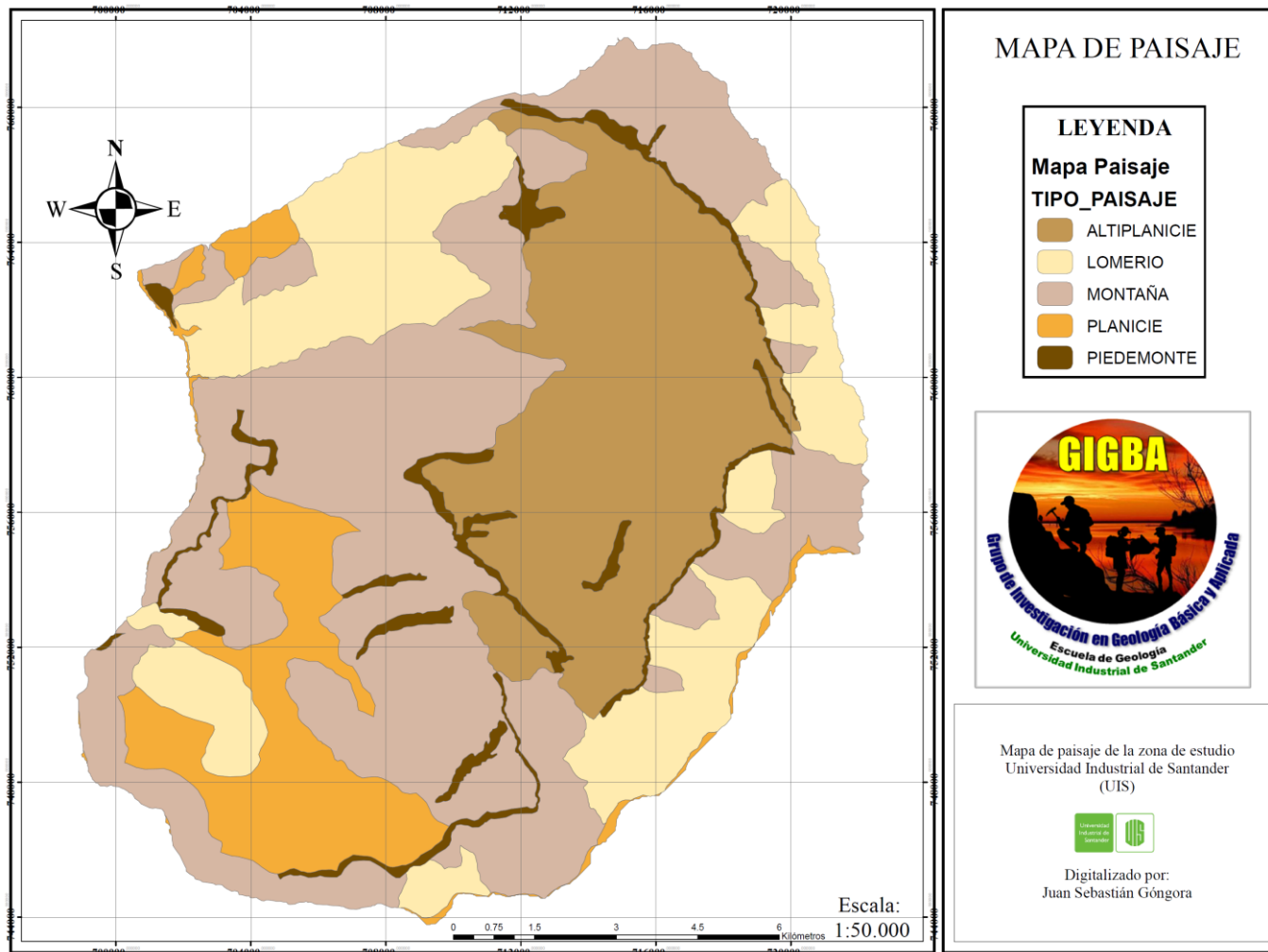
Apéndice A.

Mapa de climas.



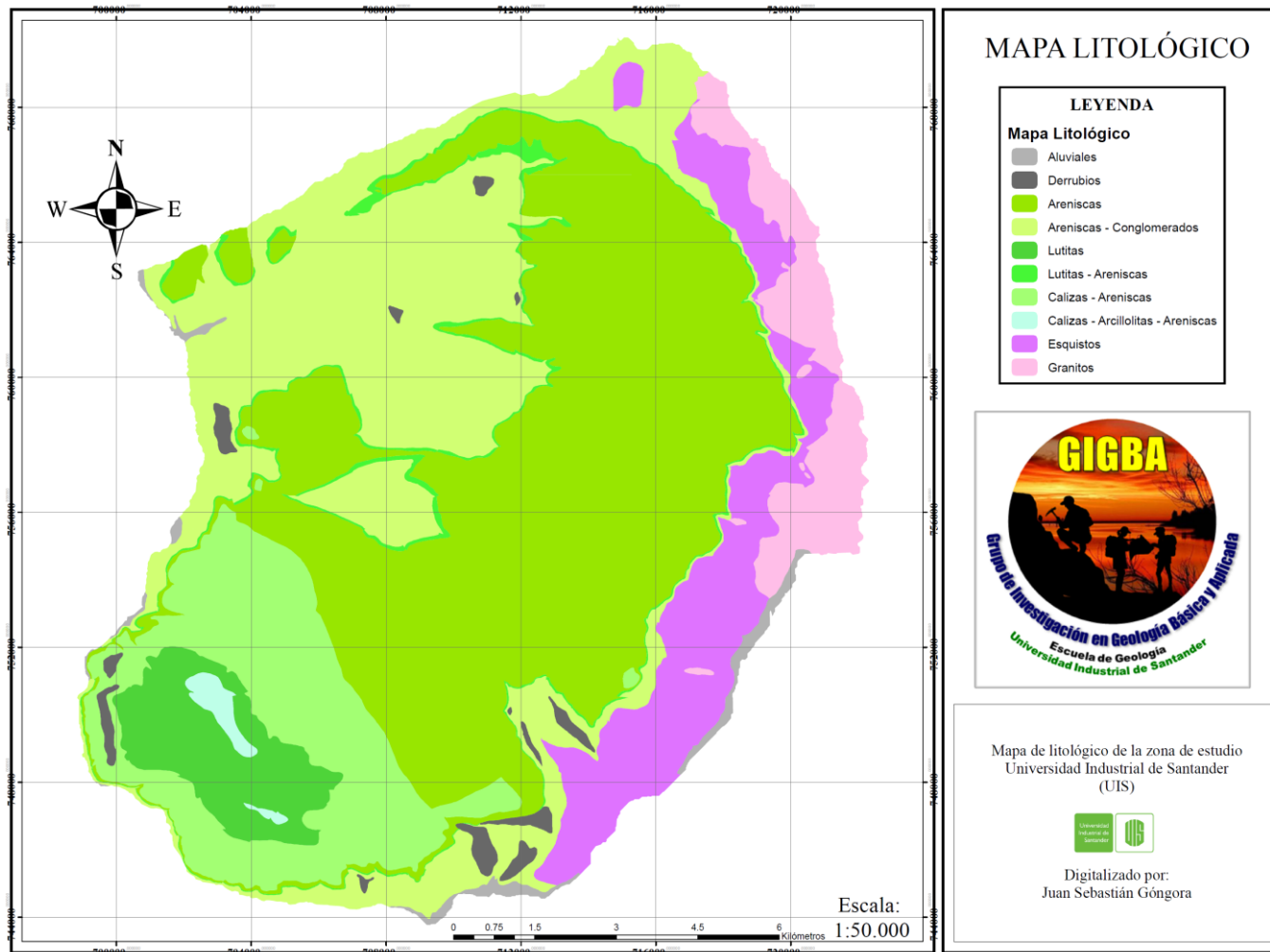
Apéndice B.

Mapa de paisaje.



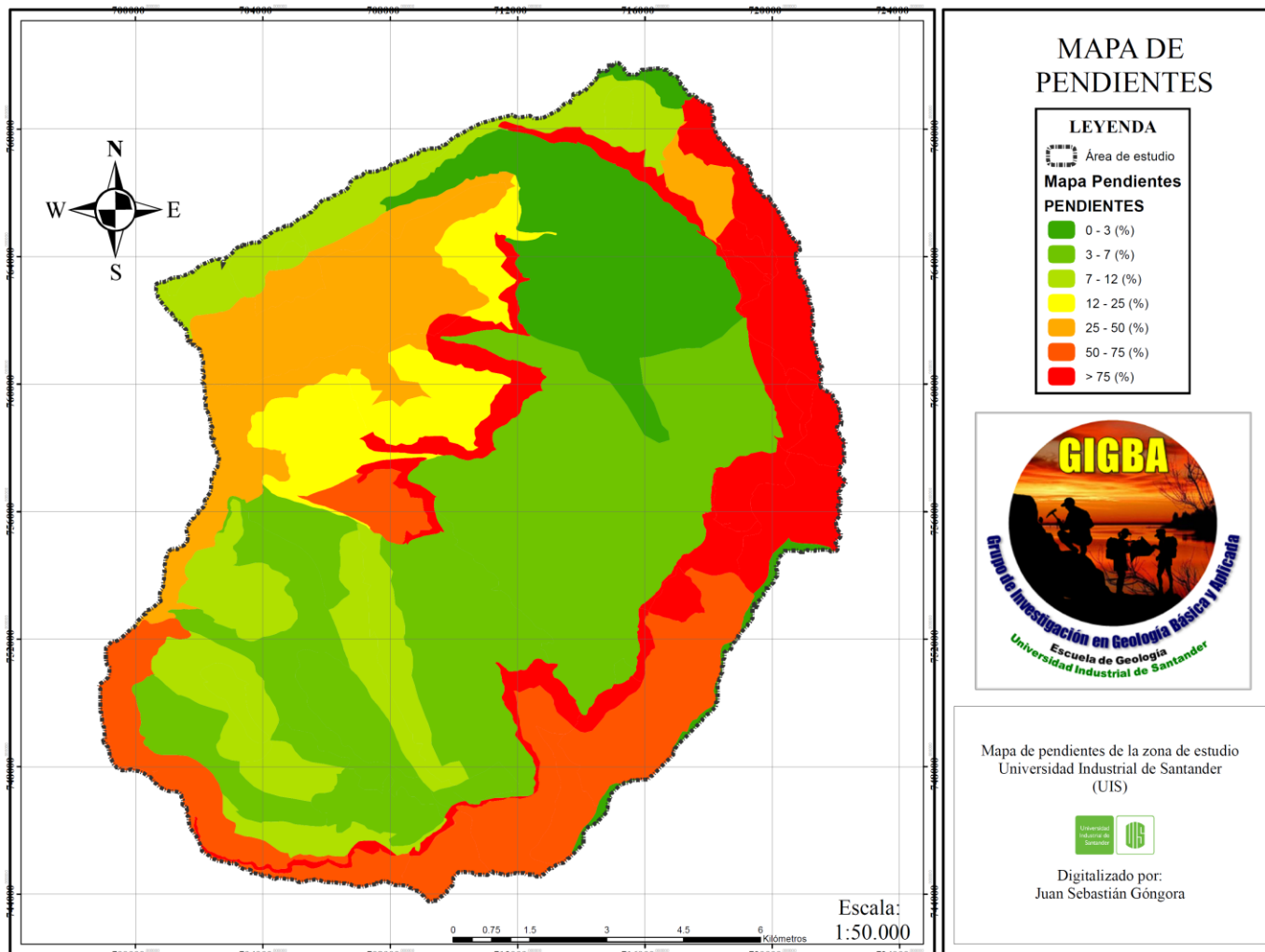
Apéndice C.

Mapa de litologías.



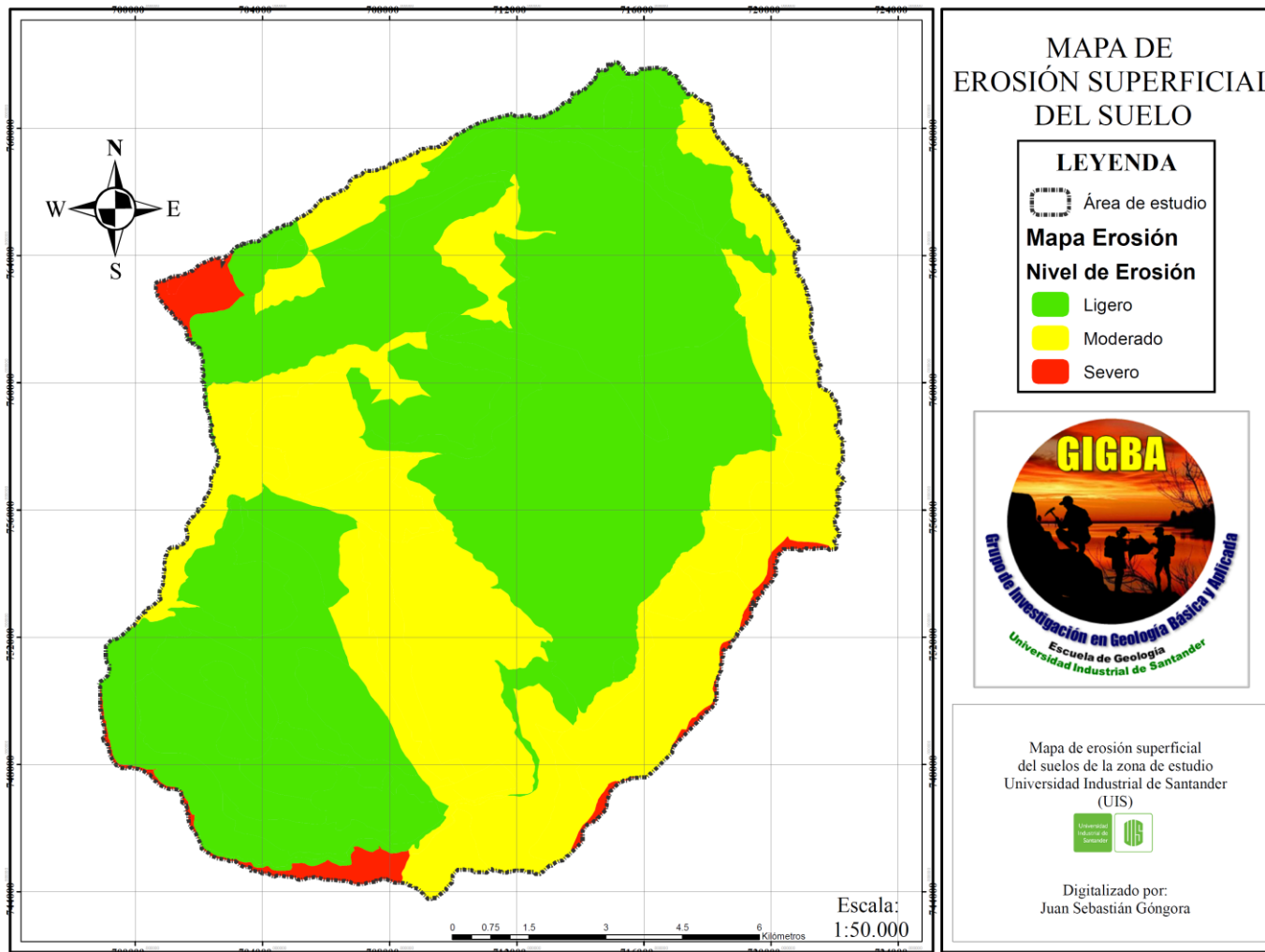
Apéndice D.

Mapa de pendientes



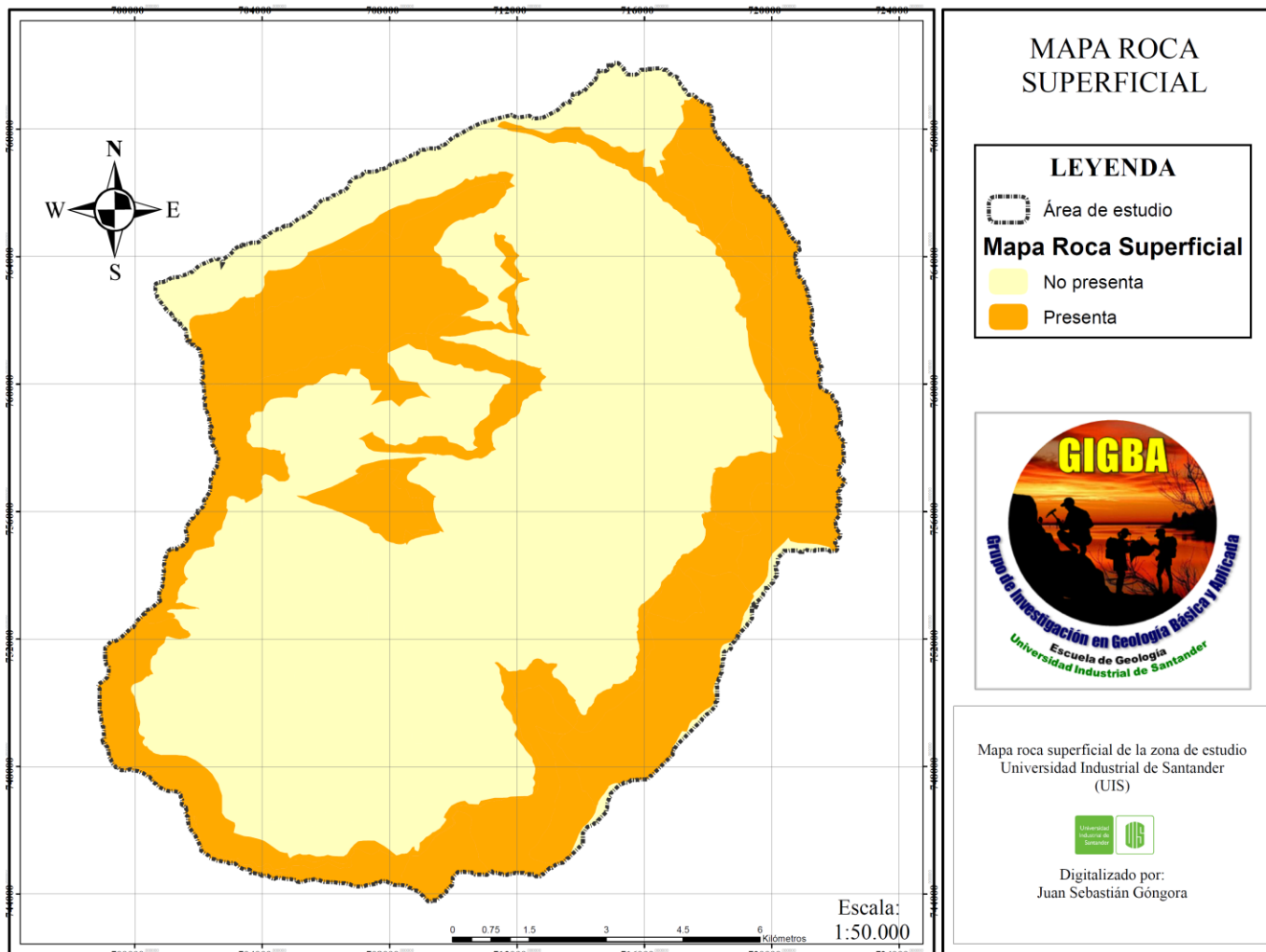
Apéndice E.

Mapa de erosión superficial del suelo.



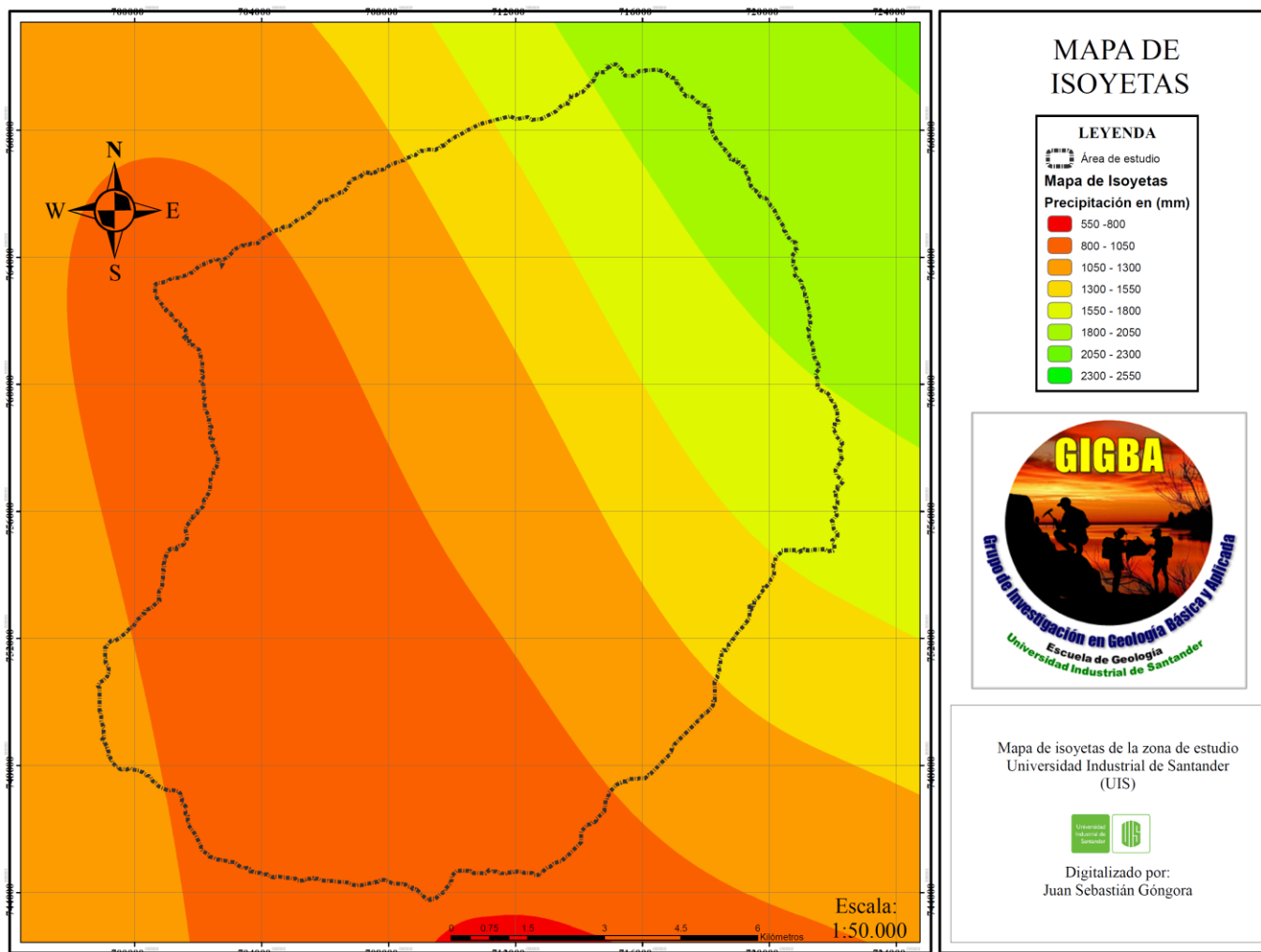
Apéndice F.

Mapa de roca superficial.



Apéndice G.

Mapa de Isoyetas.



Apéndice H.

Leyenda mapa multitemporal.

